

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MOLDEO AUTOMATIZADO PARA
PIEZAS COMPLEJAS EN SUPERALEACIONES**

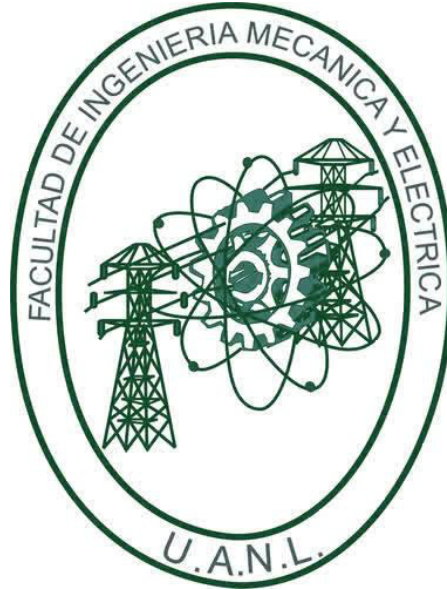
POR

JUAN WLFRANO MORALES RUIZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

SEPTIEMBRE, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MOLDEO AUTOMATIZADO PARA
PIEZAS COMPLEJAS EN SUPERALEACIONES**

POR

JUAN WLFRANO MORALES RUIZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

SEPTIEMBRE, 2017

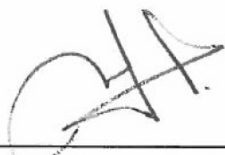
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MOLDEO AUTOMATIZADO PARA PIEZAS COMPLEJAS EN SUPERALEACIONES”** realizada por el estudiante Juan Wlfrano Morales Ruiz con matrícula 1707088, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

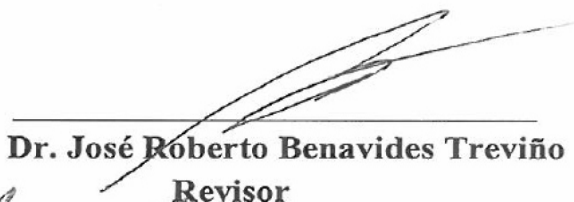
COMITÉ DE TESIS



Dr. Arturo Juárez Hernández
Asesor



Dr. Marco Antonio L. Hernández
Revisor



Dr. José Roberto Benavides Treviño
Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA...

Quiero dedicar esta tesis en su totalidad a mis padres, quienes siempre han sido un motor, mi principal apoyo, mi fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias al CONACYT, por brindarme la oportunidad de proseguir con mi crecimiento académico.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por abrirme las puertas y darme todas las herramientas para llevar acabo mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por tener disponibles unas excelentes instalaciones aptas para la experimentación e incentivar el desarrollo.

A los doctores del Posgrado en Materiales, ya que gracias a sus enseñanzas este alumno con tantos defectos y tan contadas virtudes pudo concluir de la mejor manera posible su Maestría.

Al Doctor Arturo Juárez Hernández, ya que siempre lo vi como un ejemplo a seguir y nunca dejo de apoyarme, no sólo me brindó sus conocimientos, sino también su amistad.

A la empresa Cronite de México por permitirme desarrollar mi proyecto con sus materiales y experimentar en sus instalaciones, además de darme la oportunidad de afianzarme como ingeniero en la empresa.

Pero a quien más quiero agradecer es a mis compañeros de maestría, ustedes hicieron que estudiar se volviera divertido y nos hizo formar un gran grupo de amigos, que espero estemos para apoyarnos por muchos años.

ÍNDICE

DEDICATORIA...	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE.....	VI
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.4 HIPÓTESIS.....	15
1.5 JUSTIFICACIÓN	16
1.6 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	17
CAPÍTULO 2 MOLDEO.....	18
2.1 INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN (HISTORIA)	18
2.1.1 LA FUNDICIÓN EN MÉXICO	19
2.2 INTRODUCCIÓN AL MOLDEO CON ARENA	20
2.3 MOLDEO CON AGLOMERANTES QUÍMICOS.....	22
2.4 SUPERALEACIONES.....	25
2.4.1 SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL	27
2.5 SISTEMAS DE FUNDICIÓN AUTOMATIZADOS.....	28
2.5.1 PROTOTIPADO RÁPIDO.....	29
2.5.1.1 MÉTODOS DE PROTOTIPOS RÁPIDOS	35
2.6 MAQUINADO	44
2.6.1 MAQUINADO DE MOLDES	45
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL	47
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	47
3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ARENAS	47
3.1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS RESINAS	49
3.1.3 DISEÑO DE PROBETA EXPERIMENTAL	54
3.1.4 DISEÑO DEL MOLDE	54
3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	55
3.2.1 PRUEBAS DE MEZCLADO.....	56
3.2.2 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (AFS TENSILE STRENGTH TESTING).....	60
3.2.3 PRUEBAS PRELIMINARES DE MAQUINADO	62
3.2.4 PRUEBAS PRELIMINARES DE VACIADO (UNIVERSIDAD/ALUMINIO)	66
3.2.5 PRUEBAS DE VACIADO (CRONITE: ALEACIÓN NÍQUEL-CROMO [37-18]).....	69
3.2.6 PRUEBAS DE MAQUINADO (ROBOT).....	72

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
4.0 RESULTADOS OBTENIDOS	79
4.1 OBTENCIÓN DE LA MEZCLA IDEAL	83
4.1.1 TIEMPO ÓPTIMO DE MEZCLADO:	83
4.1.2 TIEMPO ÓPTIMO DE GASIFICADO	84
4.2 RESULTADOS DE MAQUINABILIDAD	88
4.2.1 MAQUINADO CON EQUIPO CONVENCIONAL	89
4.3 PRUEBAS DE VACIADO	95
4.3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VACIADO PRELIMINARES	95
4.4 MAQUINADO CON ROBOT	96
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.0 CONCLUSIONES	102
5.1 RECOMENDACIONES	105
5.2 TRABAJO FUTURO	107
ÍNDICE DE TABLAS	111
ÍNDICE DE FIGURAS	112

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad establecer las condiciones actuales del proceso de moldeo de la empresa de Cronite de México, así como el desarrollo de propuestas que ayuden a mejorar el mismo con la correcta implementación de tecnologías novedosas para el área de moldeo, estableciendo así un estándar de trabajo que no existe actualmente en México, incrementando la competitividad de la empresa en que la empresa es líder a nivel mundial.

Para que esto se lleve a cabo deberán conocerse a fondo los procesos que se desarrollan en la empresa para así encontrar la tecnología que mejor se adapte a los procesos que la empresa realiza en la fabricación de sus productos.

Actualmente la empresa cuenta con dos métodos de moldeo; el primero es el moldeo en verde, cuyo método ha sufrido muy pocos cambios desde su aparición en la antigüedad, y el método de moldeo con el uso de resinas, que, vale la pena señalarlo, es un método más “moderno” por haberse empezado a utilizar durante el siglo XX, sin embargo ambos métodos se basan en el mismo principio, la utilización de “modelos”.

El moldeo de arena debe su éxito a que es un proceso muy simple, relativamente económico y ofrece una gran versatilidad que puede verse traducida en la fabricación de piezas de gran tamaño y con geometrías complejas.

Justamente pensando en la versatilidad que ofrecen los métodos de moldeo de arena se ideó este proyecto de investigación, en el cual se tratará de llevar tecnología del siglo XXI al moldeo de arena, adecuando un sistema automatizado de fabricación de moldes, la idea es impactar en los tiempos de

entrega de piezas, logrando producir prototipos en un menor tiempo, acortando así su validación y producción en masa.

Para esto se deben tomar a consideración las propiedades con las que debe contar la arena que se desea utilizar, así como las herramientas que intervendrán en el proceso para hacer de este método algo posible.

Capítulo 1

Introducción

Los procesos de fundición consisten en hacer los moldes, preparar y fundir el metal, vaciar el metal en el molde, limpiar las piezas fundidas y recuperar la arena para volver a usarla. El producto de la fundición es una pieza colada que puede variar desde una fracción de kilogramo hasta varias toneladas; también puede variar en su composición, ya que prácticamente todos los metales y aleaciones se pueden fundir.

La fundición se ha practicado desde el año 2000 a.C. y el proceso utilizado entonces, es poco diferente en principio del aplicado en la actualidad. Los talleres de fundición del siglo XX tienen ahora muchos propósitos: ellos pueden fundir el hierro y luego maquinar el producto.

Sin embargo, la investigación ha traído consigo aplicaciones y adaptaciones que hasta entonces no se habían considerado dentro del alcance de la industria de la fundición. Las altas cifras de producción, el buen acabado de las superficies, las pequeñas tolerancias en las dimensiones y la mejoría en las propiedades de los materiales, han permitido fundir partes de forma complicada ya sea de tamaño o pequeño.

Aunque los moldes se pueden hacer de metal, yeso, cerámica u otra sustancia refrigerante, este proyecto de investigación tiene como finalidad la preparación de moldes de arena.

El moldeo de arena es por mucho el proceso de fundición de metales más usado a nivel mundial, debido en gran medida a los bajos costos de inversión y gran versatilidad, aunque no se sabe la fecha exacta del origen de la fundición, lo que sí se sabe es que este proceso tiene un origen gracias al moldeo en arena, a pesar de su longevidad este método ha cambiado muy poco desde sus inicios hasta lo que es hoy en día. Sin embargo, existen algunas variaciones que aunque básicamente el proceso de fabricación es el mismo, su gran diferencia radica en el método en el que la arena es preparada.

El moldeo con arena se puede dividir en dos grandes categorías que son, moldeo con arena verde y moldeo con aglomerantes químicos.

Estos dos métodos son usados para unir los granos de arena que constituyen los moldes para fundición; en el moldeo en verde se utiliza arcilla y agua para unir la arena, mientras los métodos de moldeo de arena unida con resina utilizan diferentes sistemas químicos de unión para hacer el molde.

A pesar de sus diferencias, ambos métodos tienen cierta similitud, puesto que se basan en el uso de patrones o modelos para generar la forma externa de la pieza a fundir.

En el caso particular de moldeo con mezclas de arena y resinas autofraguantes, se puede decir que, este método tiene a su vez sus propias clasificaciones, ya que existen diferentes formas de acelerar el proceso de sinterizado de los moldes, ya sea con el uso de un catalizador, o bien, por medio de la gasificación del molde.

1.1 Descripción del problema

En cuanto a moldeado en verde se refiere la empresa Cronite de México no es la excepción, pues su proceso de fabricación de piezas complejas en superaleaciones también se basa en la utilización de modelos, cuyos diseños son solicitados a la matriz de la empresa, localizada en Francia, está a su vez los solicita a sus diseñadores, localizados en Republica Checa, o Inglaterra según corresponda, provocando que los tiempos de espera se alarguen, generando retrasos en la producción.

Por otro lado, cuando un modelo será utilizado para grandes producciones o para clientes recurrentes, estos pueden ser amortizados con la producción. Sin embargo existen ocasiones en las que el cliente solicita una pieza de la cual no hay modelo similar y cuya producción será reducida o tal vez única, lo que origina que el costo del modelo aumente y no logre amortizarse adecuadamente con la producción deseada, con la vista puesta en la solución a este problema, se planteó la posibilidad de implementar una nueva tecnología de fabricación en la cual, por medio de un proceso mecanizado se pudieran producir piezas sin la necesidad de utilizar un modelo, o bien que ese mismo mecanismo diera la posibilidad de fabricar el modelo, evitando así la dependencia de un proveedor o de las filiales que al estar tan distantes retrasan la producción por la dificultad en la comunicación.

1.2 Planteamiento del problema

Pensando en estos inconvenientes, se manejó la alternativa de la automatización del proceso de fabricación, con el uso de equipos CNC, que ayuden a la creación de moldes sin la necesidad de utilizar un modelo, es decir que, la geometría del modelo sería maquinada directamente en el molde.

En base a ese argumento, el maquinado de arena, fue la virtual solución. En la actualidad un modelo en CAD, sólo es utilizado con fines exploratorios o dimensionales, sin embargo la idea es una utilización global del diseño en CAD, proceso que intentaría abarcar desde el diseño piloto, hasta la pieza terminada.

Este proceso disminuiría los tiempos de fabricación, los costos que implica la fabricación de los modelos, además de eliminar los defectos causados por la degradación paulatina de los modelos.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es poder establecer las condiciones actuales del proceso de moldeo de la empresa Cronite de México y de esta manera proponer mejoras para el mismo, haciendo uso de tecnologías novedosas de manufactura.

Los objetivos específicos son:

- Identificar los distintos procesos de moldeo de arena que desarrolla la empresa.
- Medir los parámetros de control de arenas establecidos en la empresa (caracterizar las arenas).
- Actualizar los rangos en los que deben manejarse dichos parámetros.
- Definir las condiciones óptimas de los procesos de mezclado de arenas.
- Encontrar una mezcla de arena con la capacidad de ser maquinada por un equipo CNC.
- Establecer los parámetros óptimos para el mecanizado de la arena una vez que se hayan cumplido los objetivos anteriores.

1.4 Hipótesis

Los moldes de arena fabricados con resinas autofraguantes pueden ser maquinados, garantizando la geometría de la pieza vaciada y otorgando un acabado superficial que iguale o supere a los moldes realizados con modelos físicos.

1.5 Justificación

Como se mencionó anteriormente los procesos de moldeo en arena tienen poca innovación desde el punto de vista tecnológico, es por eso que encontrar la manera de mejorarlo a partir de la automatización del proceso es la alternativa más viable. Se reducirían considerablemente los tiempos de espera, pues el molde en cuestión sería fabricado directamente en el momento de su producción, es decir no se ocuparía tener un modelo físico de la pieza, sino solo la tecnología para su fabricación.

Además, durante el tiempo en el que equipo no esté trabajando en la fabricación de moldes, podría adaptarse para la fabricación de los modelos de la planta, aumentando aún más la productividad, pues ya no se necesitarían servicios externos para la fabricación de un modelo.

1.6 Metodología de Investigación

La metodología seguida para el desarrollo de la presente investigación es la siguiente:

- Se estudiaron los distintos procesos de moldeo usados en la planta para la fabricación de piezas complejas en superaleaciones.
- Se estudiaron los parámetros de control usados en las arenas para mejorar el desempeño de las mismas.
- Se hicieron mediciones de los parámetros, se tomaron muestras de los tipos de arena, esto con el fin de establecer los rangos ideales que debían ser usados en los parámetros de las arenas.
- Como parte de la definición de los parámetros, se establecieron las condiciones con las que deben ser mezclados los distintos tipos de arena utilizados en la planta, con el fin de establecer aquellos que optimizan el proceso, todas aquellas condiciones que intervienen durante el proceso de mezclado y preparación de arena son sujeto de estudio.
- Una vez definida la mezcla que mejor comportamiento mostró durante el proceso de preparación, se definieron los parámetros con los cuales dicha mezcla puede ser maquinada, proceso importante para seleccionar aquellos que junto con la mezcla mostraron un mejor desempeño.

Capítulo 2

Moldeo

2.1 Industria de la fundición (Historia)

La utilización de los metales, marca dentro de la historia de nuestro planeta una etapa tan decisiva como los más sensacionales descubrimientos de nuestro moderno mundo contemporáneo; sin equivocación, ella llegó a ser la piedra angular del desarrollo actual. Su importancia es tal, que los sabios e historiadores no pudieron definir mejor las fronteras de las épocas o eras, que con palabras alusivas: edad de bronce o edad de piedra.

El abandono del uso de la piedra como materia prima natural y la búsqueda de mejores materiales, debía satisfacer la necesidad de fabricar herramientas y armas que al hombre de entonces, le permitiera sobrevivir en un medio donde la competencia con los animales de la época era totalmente desventajosa, sin contar con las rigurosas condiciones de desenvolvimiento habitacional. Todo ello forzó la búsqueda de materiales y procesos para conformar metales, que se descubrirían al finalizar la edad de piedra, dando paso al nacimiento de la metalurgia.

La fundición de metales es una tecnología prehistórica, pero que aparece recientemente en los registros de la arqueología. Nació cuando los antiguos usaron las tecnologías del fuego, llamadas piro tecnologías las

cuales proveyeron las bases del desarrollo de la fundición. Se usó el calor para lograr hierro esponjoso y el barro quemado para producir cerámica.

Los objetos metálicos antiguos que conocemos, tienen más de 10.000 años y no se produjeron por fusión, sino que fueron forjados; eran pequeños pendientes y collares, los cuales fueron martillados de pepitas de cobre nativo y no requirieron soldadura. El periodo arqueológico en el cual el trabajo del metal tomó lugar, fue el Neolítico.

Más tarde varias culturas trabajarían el hierro, apareciendo piezas aleadas, sin embargo, serían muchos años después, cuando se conocería la forma de reducir grandes cantidades de minerales ferrosos.

Las necesidades creadas por los grandes conflictos armados, han orillado a la humanidad a desarrollar nuevos materiales y procesos de fabricación. La aparición de nuevas aleaciones de cobre, aluminio y el desarrollo del conocimiento de los elementos químicos y de nuevos procedimientos para fabricar modelos y moldes, y mejores técnicas de fusión fueron determinantes para lograr el grado de industrialización que se logró en el principio del presente siglo.

2.1.1 La fundición en México

Como ya se ha mencionado, la industria de la fundición permite la producción de partes de formas sencillas y complejas, dependiendo de las necesidades del producto final, es uno de los métodos más costables y efectivos de manufactura. A nivel nacional es una industria que ha formado parte importante de la economía del país (3% PIB, 2008). Lamentablemente la industria de la fundición en México ha mostrado un rezago tecnológico atrás de Europa, Estados Unidos de América y Asia, ya que, solamente pocas empresas han tomado la iniciativa de invertir en tecnología para el desarrollo de sus procesos y productos.

Lo anterior, a pesar de que México llegó a colocarse dentro del “Top Ten” de los países que más toneladas de acero producían a nivel mundial (2003), sin embargo la tendencia fue en descenso, debido en gran parte a un acaparamiento de la materia prima por parte de China, además de la crisis económica y a la falta de competitividad de la industria de la fundición nacional, como resultado, se disminuyó la producción de acero del país.

A pesar de lo negativo que podría considerarse lo anteriormente enunciado, el futuro inmediato de México, muestra un panorama alentador, pero se deberá disminuir el rezago tecnológico actual, mejorando el control de los procesos básicos, empleando ingenieros capacitados e invirtiendo en nuevas tecnologías que se concentren en el desarrollo de nuevas aleaciones con un gran control microestructural, metales amorfos y nanocristalinos, por la ventaja que ofrecen en cuanto a propiedades mecánicas y físicas.

2.2 Introducción al moldeo con arena

El moldeo en arena, en su forma más básica, es barato y fácil de entender. Por esta razón, se utiliza a menudo en las escuelas como una introducción a la tecnología metalúrgica.

El moldeo con arena se puede dividir en dos categorías que dependen de las materias primas utilizadas en el proceso, estas dos categorías son, moldeo con arena en verde y moldeo con aglomerantes químicos.

La forma más antigua y más básica de fundición en arena es el moldeo en arena verde. Una arena de buena calidad para moldeo puede ser de cualquier color de amarillo a rojo, y después del uso de unos días resulta negro o gris, no verde. Así arena verde no se refiere al color. ‘Verde’, en este sentido, significa sus cualidades de unión naturales, sin utilizar aglutinantes artificiales, aditivos o catalizadores (Hurst, Metal Casting, 1996).

Estos dos métodos son usados para unir los granos de arena que constituyen los moldes para fundición; en el moldeo en verde se utiliza arcilla y agua para unir la arena, mientras que en los métodos de moldeo con aglomerantes, se utilizan resinas con diferentes propiedades químicas para hacer el molde.

La arena de moldeo verde es un material que después de ser compactado se convierte en una masa refractaria que cumple con las siguientes funciones:

- Obtener la forma exterior de un modelo.
- Servir de apoyo para la colocación de núcleos (corazones) que permitan dar formas internas.
- Resistir la agresión mecánica y térmica del metal.
- Permitir la obtención de una pieza con una calidad definida.

Mientras que la arena unida químicamente no requiere de un esfuerzo mecánico para adquirir su dureza, lo que implica un ahorro energético.

Los procedimientos de estos métodos son sumamente diferentes, por lo que este trabajo se centrara en el moldeo con aglomerantes químicos.

El método en sí, tiene sus propias variantes (Chaparro Ferrucho, 2006), se suelen compara las técnicas de endurecimiento de arena por gasificación con un sistema de arenas autofraguantes. El primero es un método más tradicional, que utiliza CO₂ inyectado directamente al molde, y aunque ha demostrado buenos resultados desde los inicios de su utilización, tiene una ligera desventaja con respecto al método de resinas autofraguantes, la principal de ellas es: el tiempo de espera para retirar la caja de machos y modelo, debido a que se es necesario esperar un lapso de tiempo para que se lleve a cabo el endurecimiento del molde.

Por otro lado el sistema de moldeo con arenas autofraguantes facilita el desmoldeo y descorazonado, y aumenta la productividad porque el tiempo requerido para la elaboración de un macho y un molde es menor con respecto al proceso CO₂. Este sistema como su nombre lo indica, endurece el molde sin necesidad de estufado, ni por gasificación (como el proceso de CO₂), sino mediante la transformación química de la resina por acción del catalizador, ofreciendo un ahorro de energía.

2.3 Moldeo con aglomerantes químicos

En la década de 1940, el proceso de moldeo predominante consistía en moldeo con arena verde, para dicho proceso los corazones de arena eran fabricados principalmente mediante un proceso de curado en horno con arena aglomerada con aceites. Los sistemas de resina fueron mejorando constantemente desde su introducción (a mediados de la década de 1940) hasta lo que conocemos hoy en día.

El desarrollo de los sistemas de moldeo tomó vertiginosos cambios después de la segunda guerra mundial. Los sistemas curados con calor, los sistemas de resina por moldeo en cáscara (Shell), y sistemas endurecidos por gas dióxido de carbón-silicato fueron introducidos en la década de 1950. Mientras que en décadas posteriores, se utilizaron resinas curadas en caja caliente, sistemas de auto fraguado (que curan químicamente sin la aplicación de calor) y procesos vapor catalizador en caja fría.

En las últimas tres décadas se han introducido dentro del mercado 20 procesos de unión como se muestra en la tabla 1, estos procesos han forzado un diseño y desarrollo de equipo nuevo e innovador necesario para hacer corazones y moldes, así como recubrimientos para arena, es decir pinturas que mejoran la calidad superficial del corazón (base ZrO₂), así como aquellas que aumentan su refractariedad (base Al₂O₃) y equipo de manejo de arena.

Tabla 1. Sistemas de resina utilizados industrialmente.

Fecha de Introducción	Proceso
Antes de	Moldeo con aceite
1950	Moldeo de cáscara (Shell)
1952	Silicato/CO ₂
1953	Aceites autofraguantes al aire
1958	Autofraguante con catalizador ácido
1960	Caja caliente Furánica
1962	Caja caliente fenólica
1965	Autofraguante uretano
1968	aja fría fenol-uretano
1968	Autofraguantes con catalizador ester-silicato
1970	Autofraguante fenol uretano
1974	Autofraguante fosfato alúmina
1977	Furano SO ₂
1978	Autofraguantes polyol uretano
1978	Caja tibia
1982	FRC SO ₂
1983	Epoxi SO ₂
1984	Autofraguante éster fenólico
1985	Caja fría éster fenólico
1992	Fosfato / óxido metal

2.3.1 Clasificación del moldeo con aglomerantes químicos

Existen cuatro categorías para los diferentes sistemas aglutinantes. La clasificación, de acuerdo con los componentes contenidos en los aglomerantes es, en orgánicos o inorgánicos, por el mecanismo de catalización, por el mecanismo físico de curado y por la forma en que el sistema es activado.

Sistemas inorgánicos u orgánicos. Los sistemas aglutinantes inorgánicos son los que no contienen carbono en sus moléculas aglutinantes, por lo general son muy poco reactivos y alcanzan menores resistencias por lo cual necesitan ser utilizados en tiempos de desarrollo mayores, con el fin de incrementar su resistencia; estos sistemas están basados en una tecnología silicato y fosfato/metal óxido. Todos los demás sistemas utilizados son del tipo orgánico.

Por mecanismo de catalización. Otra forma de clasificar a los sistemas es por el mecanismo por el cual se cataliza químicamente, tabla 2. Los aglutinantes de tipo ácido curan mediante la adición de un material alcalino, los sistemas aglutinantes del tipo básico se curan al adicionar un material ácido.

Existen otros sistemas que curan mediante diversos mecanismo químicos y son independientes del pH.

Tabla 2. Clasificación de los sistemas aglutinantes por el mecanismo de catalizado.

Ácido	Básico	Otro
Silicato CO ₂	Autofraguante ester fenólico	Moldeo en cáscara
Caja tibia	Caja fría éster fenólico	Autofraguante silicato
Caja caliente	Autofraguante uretano	Core oil oxidación
SO ₂ Furanico	Caja fría fenol-uretano	Fosfato/óxido metal
SO ₂ acrílico epoxi	Autofraguante polyol uretano	

Por mecanismo físico de curado. Los sistemas de resinas también son clasificados basados en la manera en que el corazón o molde de arena endurece físicamente. La resina cura de diferentes maneras, mediante el

contacto con un catalizador vaporizado (caja fría); al ser expuesto al calor y promover su curado (caja caliente); y al ser mezclado con un líquido catalizador que reacciona con un aglutinante a temperatura ambiente (autofraguante). Cuando un aglutinante reacciona completamente se dice que ha polimerizado y alcanza un curado total, es decir se vuelve térmicamente estable.

Sistemas activados térmicamente. En estos sistemas el calor es el principal agente de curado, los sistemas más conocidos son el moldeo en cáscara (shell), caja caliente y caja tibia furánica. Estos sistemas son aglutinados y se curan aplicando calor al molde de arena recubierta con anterioridad.

2.4 Superalcaciones

Se acostumbra a designar con el nombre general de *superalcaciones* a un grupo de materiales base níquel, base hierro-níquel o base cobalto que se usan a temperaturas superiores a 540°C (LAMET, et al., 1990). La característica más destacable de estas superalcaciones es su capacidad de operar de forma satisfactoria bajo carga a temperaturas muy próximas a las del inicio de su punto fusión, del orden de un 85% de esta cifra en grados Kelvin (Atxaga, Erauzkin, E. Irisarri), valor que resulta superior a los que son capaces de ofrecer cualquier otro tipo de materiales ingenieriles.

Este hecho constituye un punto muy favorable al uso de estos materiales ya que la posibilidad de trabajar a una temperatura más alta se traduce en un aumento en el rendimiento. Resistencia a la fluencia y resistencia a la oxidación son algunos de los criterios principales en el diseño de estos materiales. Las superalcaciones se basan en los elementos del Grupo VIII B, por lo general son el resultado de la combinación de Fe, Ni, Co y Ti, así como cantidades pequeñas de W, Mo, Ta, Nb, Cr, y Al.

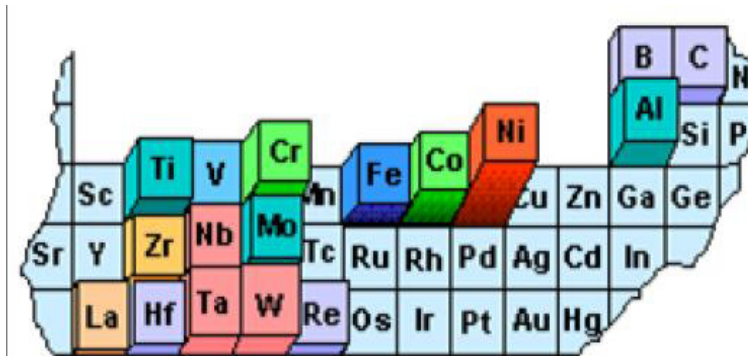


Figura 1. Elementos típicos de las superaleaciones.

Típicamente las superaleaciones suelen tener una estructura o matriz austenítica de cristales cúbicos centrada en las caras.

Algunos ejemplos de superaleaciones comerciales son:

- Hastelloy (Ni 57, Co 2.50, Cr 15.50, Mo 16, W 4, Fe 5.50)
- Inconel (Ni 50-55, Co 1, Cr 17-21, Mo 2.80-3.30, Fe Balance).
- Monel (Ni 63.0, Cu 28.0-34.0, Mn 2.00, Fe 2.50).
- Aleaciones Rene (Ni 59-65, Co 7-9, Cr 12-14, Mo 3.30-3.70, W 3.30-3.70, Al 3.30-3.70, Nb 3.30-3.70, Ti 2.30-2.70).
- Mancellium (Ni 74-76, Cr 16-17, Al 4.3-4.8, Fe 3.5 máx.)
- Incoloy (Ni 30-35, Cr 19-23, Fe Balance).

Las superaleaciones o aleaciones de alto rendimiento resisten las condiciones más críticas y presentan las siguientes características generales:

- Excelente resistencia mecánica.
- Elevada resistencia a altas temperaturas (calor).
- Buena resistencia al ataque del medio ambiente (incluyendo nitruración, carbonización, oxidación y sulfuración).
- Excelente resistencia a la deformación.
- Resistencia a la ruptura por estrés.
- Buena estabilidad metalúrgica (estabilidad en la superficie).

- Expansión térmica muy útil.
- Resistencia a la fatiga térmica.
- Resistencia a la corrosión.
- Buena resistencia a cargas elevadas.
- Resistencia a las vibraciones.

Las aplicaciones típicas se encuentran principalmente enfocadas en el campo de la industria aeroespacial, aeronáutica y eléctrica. Las principales aplicaciones son:

- Reactores nucleares.
- Plantas eléctricas.
- Tubos intercambiadores de calor.
- Revestimientos de barrera térmica (TBC).
- Motores de gasolina.
- Ambientes ácidos o agua salada. Se utilizan en lugar del acero inoxidable, previniendo la corrosión.
- Industria marina.
- Submarinos.
- Turbinas marinas.
- Industria de procesos químicos y petroquímicos.
- Turbinas de gas industrial.
- Para ambientes extremos (alta temperatura).

2.4.1 Superalaciones base Níquel

Las superaleaciones base níquel destacan por la combinación de propiedades, entre estas buenas propiedades se deben citar, su elevada resistencia mecánica, ductilidad, alta conductividad térmica, baja expansión térmica y la estabilidad metalúrgica que presentan a temperaturas elevadas a las que hay que añadir la alta resistencia que oponen a un ataque provocado

por el medio ambiente en que operan, excelente resistencia frente a la fluencia, tenacidad y resistencia frente a la fatiga térmica (ASM International Handbook Committee, 1990).

La principal desventaja que presentan estas aleaciones es su elevada densidad, dicho aspecto debe ser considerado a la hora de optar por su uso en componentes aeronáuticos donde la disminución de peso constituye un factor fundamental a la hora de seleccionar los materiales. No obstante, los intentos de desplazar a estas aleaciones por otros materiales más ligeros se han saldado con fracasos, debido al gran rendimiento que ofrecen bajo condiciones extremas de esfuerzos y temperatura.

Las superaleaciones base níquel pueden clasificarse en tres grandes grupos; las que constituyen soluciones sólidas, las endurecibles por medio de un tratamiento térmico de envejecimiento que altera el número, forma y tamaño de las partículas de segunda fase y las endurecibles por dispersión de partículas que no son modificables por tratamiento. El primer grupo destaca por su excelente comportamiento frente a la corrosión pero no poseen buenas propiedades físicas y mecánicas a temperaturas elevadas, por este motivo suelen ser excluidas. El tercer grupo presenta la ventaja de no sufrir un deterioro microestructural ni una merma en sus propiedades por su permanencia prolongada a temperatura elevada pero su volumen de utilización es muy reducido. Con gran diferencia, el segundo grupo de aleaciones constituye el más ampliamente empleado en aplicaciones que requieran trabajar a temperaturas elevadas.

2.5 Sistemas de fundición automatizados

Actualmente en la industria de la fundición se utilizan equipos mecanizados de alta producción de moldeo con la finalidad de obtener

moldes a un costo unitario muy competitivo. Con los sistemas automatizados se llega a tener una amplia ventaja sobre los sistemas de operación manual.

Los sistemas automáticos de moldeo y sistemas de manejo de moldes ofrecen altas tasas de producción, buena calidad de piezas vaciadas y un alto grado de consistencia en las fundiciones. Para tener una adecuada operación de los sistemas automatizados se requiere que se les proporcione suficiente cantidad de metal fundido, un sistema de dimensiones considerables para manejo de arena, así como también un conjunto de equipos periféricos disponibles para lograr un proceso continuo.

Otra forma de utilización de la tecnología en esta industria es en la aplicación de métodos de colada continua (Kursfeld, A., 1992), con la creación de un dispositivo capaz de controlar la descarga del metal fundido.

Sin embargo la automatización de los procesos de fundición parece haberse estancado (Bernard, A., Delplace, J. C., Perry, N., & Gabriel, S., 2003), pues además de los antes mencionado, los avances en este sector se ven reducidos en mejorar la cantidad de moldes fabricados o en aumentar la distribución de metal fundido.

2.5.1 Prototipado Rápido

El término "prototipado rápido" (RP, por sus siglas en inglés) se refiere a una clase de tecnologías que pueden construir de forma automática los modelos físicos de un diseño asistido por computadora (CAD) o al grupo de técnicas utilizadas para fabricar rápidamente un modelo a escala de una parte física o montaje usando un CAD en tres dimensiones (Mahendru, 2013). Las "impresoras tridimensionales" (figura 2) permiten a los diseñadores crear rápidamente prototipos tangibles de sus diseños en lugar de dos imágenes dimensionales. Estos modelos tienen numerosos usos. Son excelentes ayudas visuales para comunicar ideas con compañeros de trabajo o clientes, aparte de las pruebas de diseño. En todo el mundo, la ingeniería tiene un lenguaje

común y una meta común "mejorar la calidad de vida" de la humanidad, sin ninguna restricción.



Figura 2. Máquina prototipadora marca Dimension SST 1200st.

El prototipado rápido es un proceso utilizado para fabricar artículos de plástico, metal o cerámicos, dicho proceso utiliza una tecnología conocida como *Additive Technology* ya que como su nombre lo indica, se basa en el principio de ir añadiendo material capa a capa (Mahendru, 2013), de ésta manera se evita la fabricación de costosos moldes para realizar un prototipo que podría cambiar su forma dependiendo de los resultados obtenidos durante las pruebas de desempeño a las que estará sometido.



Figura 3. Construcción de una casa por el método "Additive Technology" con el uso de una impresora 3D.

El prototipado rápido es una tecnología que está revolucionando el proceso de fabricación. Las técnicas de prototipado también se pueden utilizar para hacer replicar el proceso denominado mecanizado rápido e incluso la producción de piezas de calidad (fabricación rápida). Los diseñadores siempre han utilizado "prototipos" y el *RP* les permite hacerlos más rápido y menos costoso.

Para las pequeñas series de producción y objetos complicados, el prototipado rápido es a menudo el mejor proceso de fabricación disponible, aunque también es cierto que, el término "rápido" es relativo, debido a que la mayoría de los prototipos requieren de tres a setenta y dos horas para construirse dependiendo del tamaño y la complejidad del objeto. Esto puede parecer lento, pero es mucho más rápido que las semanas y los meses o inclusive años requeridos para hacer prototipos por medios tradicionales como el mecanizado.

Este espectacular ahorro de tiempo permite a los fabricantes llevar los productos al mercado más rápido y barato. En 1994, Pratt y Whitney lograron una orden de reducción de costes y ahorro de tiempo de 70 a 90 por ciento

mediante la incorporación del prototipado rápido en su proceso de fundición de precisión.

El prototipado rápido es un "proceso aditivo" en dónde la combinación de capas de papel, cera o de plástico se usan para crear un objeto sólido, mientras que la mayoría de los procesos de mecanizado (fresado, torneado, taladrado, rectificado, etc.) se conocen como "procesos sustractivos" debido a que eliminan el material de un bloque sólido. La naturaleza aditiva de RP le permite crear objetos con complicadas características internas que no pueden ser fabricados por otros medios. Para ciertas aplicaciones (Figura 4), particularmente metales, el mecanizado seguirá siendo un proceso de fabricación de utilidad.

El prototipado rápido no hará al mecanizado obsoleto, sino que lo complementara. Esta tecnología se utiliza principalmente para acortar el proceso de diseño y desarrollo.

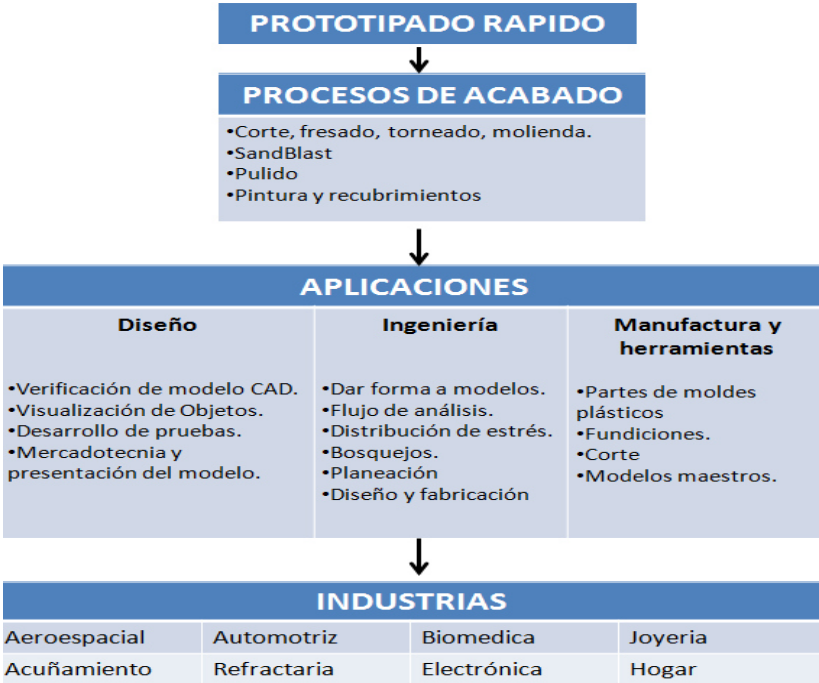


Figura 4. Aplicaciones típicas del prototipado rápido

Inicialmente el prototipado rápido solo se usaba para la fabricación de piezas no funcionales, pero hoy en día se utiliza como un proceso de fabricación más. Lo fabricado va desde prótesis dentales, hasta en la industria de la construcción para la fabricación de casas.

Hay varios tipos de prototipos:

- **Prototipos de diseño:** sirven para evaluar aspectos estéticos y ergonómicos.
- **Prototipos geométricos:** se usan para probar concordancia geométrica, la forma y los ensambles.
- **Prototipos funcionales:** prueban y muestran las características del producto final.
- **Prototipos técnicos:** se usan para evaluar todas las funciones de la pieza final.

En el diseño de una nueva pieza se tienen que tomar en cuenta diversos aspectos como la factibilidad de producción, la estética, la ergonomía, la funcionalidad, la capacidad de ensamblado, entre otros. En el cual el diseño a profundidad de la pieza es una parte fundamental de todo el proceso. De ahí depende el éxito o fracaso de la manufactura, ya que un solo error puede acarrear innumerables problemas en la producción.

Durante muchos años los prototipos han sido esenciales en el diseño de nuevas piezas en los cuales han atravesado una vertiginosa evolución en procesos como el tallado, vaciado, moldeo, entre otros, y en los materiales utilizados como madera, arcilla, yeso, etc. Siempre buscando realizar la evaluación física de un producto antes de adquirir, fabricar o iniciar un proceso productivo en masa.

Debido a la atmósfera actual de producción de nuevos productos a un ritmo constante, la fabricación de prototipos es una necesidad, en la que el reto ha sido siempre la reducción de tiempo y esfuerzo requerido para su fabricación.

Bajo estas circunstancias han surgido nuevas tecnologías que permiten la elaboración de prototipos rápidos, los cuales se definen como la conversión de un modelo diseñado en computadora, con datos CAD a uno sólido.

Existen dos grandes grupos de prototipos:

- **Método sustractivo**

Consisten en moldear un bloque de material a través de técnicas como mecanizado, fresado, torneado o taladrado. Las ventajas son el acabado, la producción en masa, la composición del material, el tamaño y la exactitud de la pieza. Sin embargo, no se pueden utilizar para producir partes con geometría muy complicada.

- **Método aditivo**

Consisten en moldear una pieza añadiendo material, ya sea en capas o gotas, entre ellas se encuentran principalmente la estereolitografía, la fabricación de objetos laminados y la sinterización selectiva por láser o por deposición de gotas. En general, estos métodos utilizan diversos tipos de material, desde fotopolímeros, como acrilatos o epóxicos, a polímeros como el ABS y el poli acrilato, también pudiendo ser otros compuestos, como cera, metales, cerámicas, arena o, incluso, papel. Éstas se han posicionado como las más rápidas, de allí su nombre de prototipos rápidos. A continuación se describen los más importantes.

- **Métodos de prototipos rápidos**

Existen muchas formas de elaborar prototipos rápidos. Sin embargo el principio de todos los métodos es el mismo; construir el modelo a través de varias capas o por depósito o fusión de gotas o partículas. En la actualidad, los procesos más comunes son:

- **Estereolitografía**

La estereolitografía es la tecnología de prototipado rápido más ampliamente usada. Ésta puede producir piezas poliméricas a detalle y altamente precisas. Fue el primer proceso de prototipado rápido, introducido en 1988 por 3D Systems, Inc., basado en trabajos del inventor Charles Hull. El método usa un láser ultravioleta (UV) de baja potencia altamente enfocado para trazar secciones de un objeto tridimensional sobre un recipiente lleno de un polímero fotosensible. En la figura 5, se enlistan sus partes y funcionamiento.

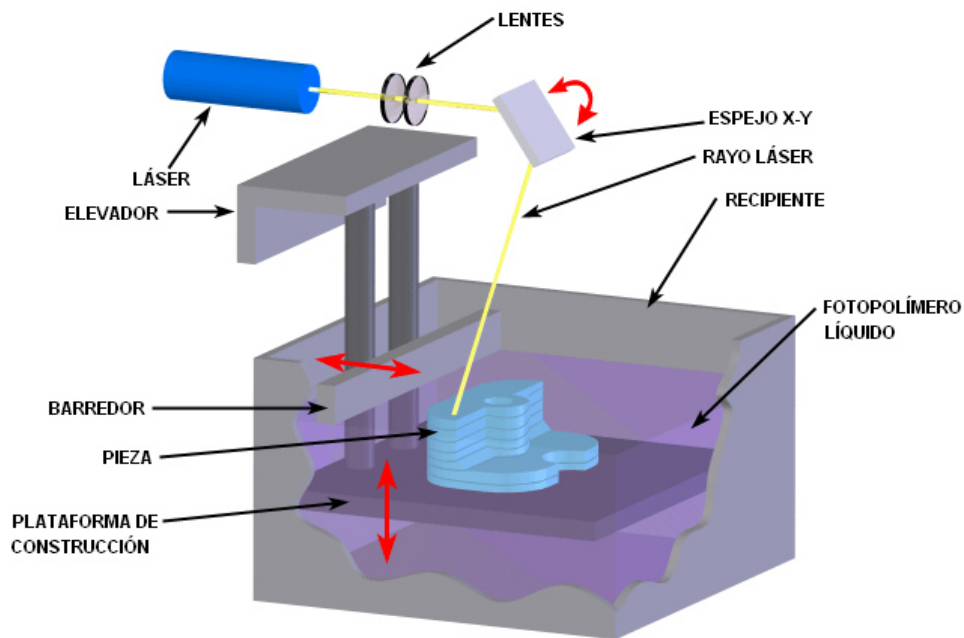


Figura 5. Partes y funcionamiento de una máquina de prototipado rápido por estereolitografía.

Conforme el láser barre la sección del sólido a formar, el polímero se solidifica y las áreas no tocadas por el láser se mantienen líquidas. Cuando una sección es completada una cuchilla de nivelación es movida a través de la superficie para alisarla antes de depositar la siguiente capa.

La plataforma es descendida una distancia igual al espesor de la capa (típicamente 0.003 – 0.002 pulgadas), y una capa subsecuente es formada sobre las capas anteriores.

Éste proceso de barrer con el láser y físicamente alisar la superficie es repetido hasta que la construcción de la pieza es completada. Una vez terminada la pieza, se eleva sobre del recipiente en donde se encuentra el polímero líquido y gracias a pequeñas perforaciones sobre la base del elevador, la pieza es drenada del exceso de material no solidificado. En la mayoría de los casos, un proceso de curado final es aplicado al introducir la pieza en un horno de luz UV, como el mostrado en la figura 6 a). Después del curado se cortan los soportes, además del material excedente, posteriormente el material puede pulirse, lijarse o aplicársele pinturas para dar acabado.



a)



b)

Figura 6. a) Horno de luz ultravioleta, en donde se introducen los prototipos para el curado final, b) Ya que el resultado de éste tipo de prototipado es una resina resistente, puede pintarse y aplicar acabados para hacerlo lucir como la pieza funcional final.

La exactitud del proceso ha mejorado conforme se ha desarrollado un mayor número de resinas. Hace dos décadas la máxima resolución era de 400 micras, llegando ahora hasta las 100 micras, lo que permite que estos prototipos puedan utilizarse en aplicaciones muy pequeñas o con un grado de acabado muy fino.

Sus aplicaciones principales son las de verificación de forma y ajuste dimensional, pruebas funcionales, ajustes de cierre, piezas altamente detalladas, modelos de presentación de nuevos productos, entre otras.

▪ Fabricación de objetos laminados

El primer sistema de manufactura de objetos laminados fue usado en 1991. Desarrollado por Helisys of Torrance, CA. Los componentes principales del sistema son un mecanismo que hace avanzar una hoja de material sobre una plataforma de construcción, un rodillo caliente que aplica presión para adherir la capa de material a la capa anterior y un láser que corta la silueta de la sección activa de la pieza a construir. En la figura 7, se muestran las partes y el principio del método.

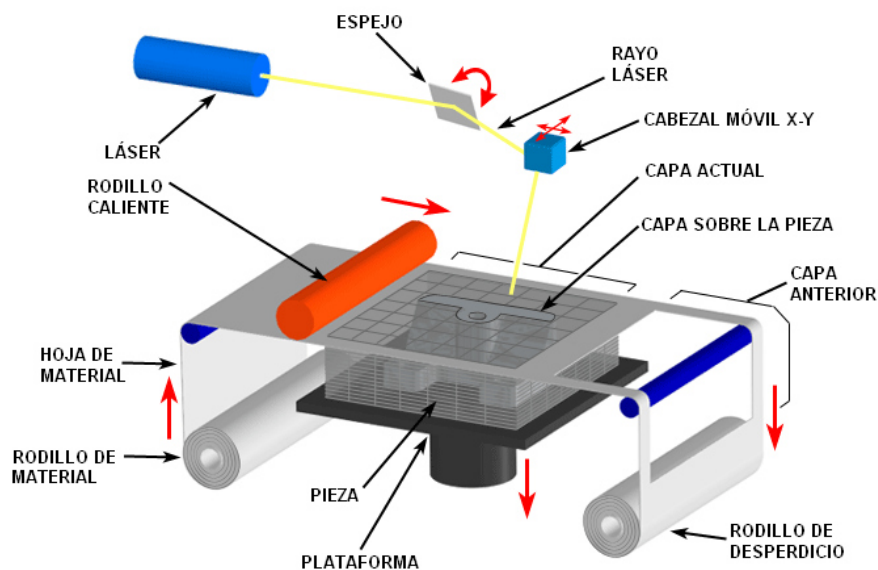


Figura 7. Partes y Funcionamiento de la fabricación de objetos laminados.

Las piezas son construidas por apilamiento, adhesión y corte de capas de hojas de material con una superficie adhesiva, una tras otra. Un láser corta la orilla de la sección activa y una vez terminada esa sección la plataforma baja un espesor igual al grosor de la hoja de material (típicamente 0.002 – 0.020 pulgadas) y otra hoja es colocada encima de las hojas previamente depositadas. Una vez depositada la capa, la plataforma sube un poco y el rodillo caliente aplica presión para unirla con la anterior. Una vez cortado, el material extra permanece para darle soporte a la pieza durante la construcción.

Sus aplicaciones principales son las de prueba de ajuste, generación de piezas sin tanta necesidad de detalle y patrones de herramientas rápidos.

Por otro lado, puede considerarse un proceso sustractivo ya que se recorta la lámina de acuerdo a la figura de la capa. El tiempo de construcción varía dependiendo de la geometría y complejidad, con tolerancias de +/- 0.13mm.

- **Modelado por deposición de fundido**

El modelado por deposición de fundido fue desarrollado por Stratasys en Eden Prairie, en Minnesota. En éste proceso un material plástico o cera es extruido a través de una boquilla que recorre la geometría de sección de la pieza capa por capa. En la figura 8, se muestran las partes principales de éste tipo de modelado.

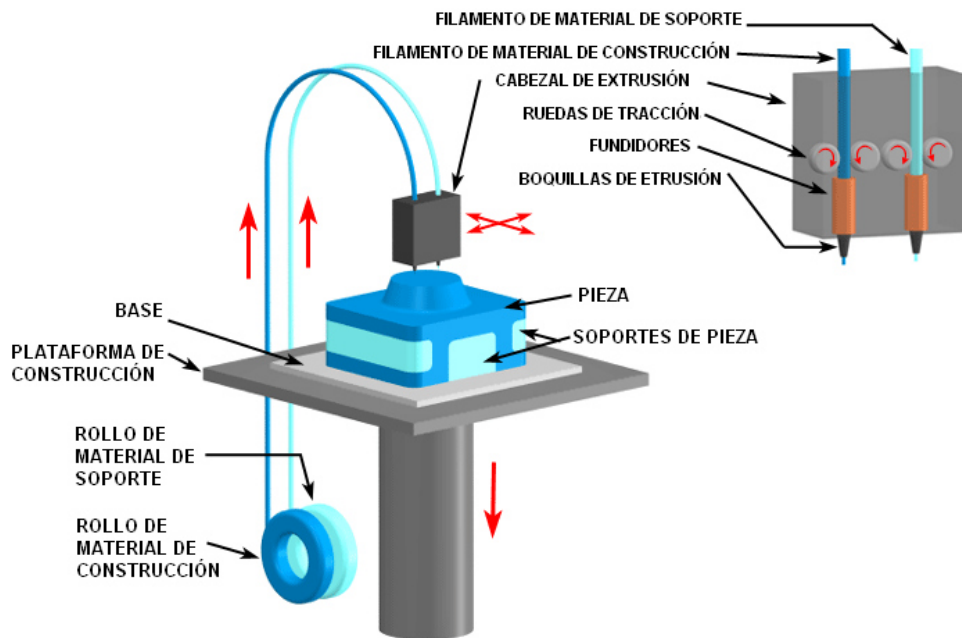


Figura 8. Partes principales y principio de operación del proceso de prototipado rápido por deposición de fundido.

El material de construcción es usualmente obtenido en forma de filamento, pero algunos tipos de máquinas utilizan pellets desde una tolva. Las boquillas contienen termo resistencias que mantienen el plástico a una temperatura justo por encima de su punto de reblandecimiento para que pueda fluir fácilmente a través de ellas formando la capa.

El plástico se endurece inmediatamente después de fluir por la boquilla y se adhiere a la capa anterior. Una vez la capa está terminada, la plataforma desciende y la boquilla de extrusión deposita otra capa. El espesor de la capa y la precisión dimensional vertical es determinada por el diámetro del extrusor que va desde 0.013 a 0.005 pulgadas. En el plano X-Y se puede obtener una resolución de 0.001 pulgadas.

Una amplia gama de materiales pueden ser utilizados, incluyendo ABS, poliamida, policarbonato, polietileno, polipropileno y cera para fundición por

investment casting. Sus aplicaciones son desde pruebas de forma y ensamble, así como funcionales, piezas pequeñas a detalle, modelos de presentación, entre otros.

▪ Sinterización selectiva por láser

La sinterización selectiva por láser fue desarrollada en la Universidad de Texas en Austin, por Carl Deckard y colegas. La tecnología fue patentada en 1989 y fue originalmente vendida por DTM Corporation. DTM fue adquirida por 3D Systems en 2001. El concepto básico del proceso es similar a la estereolitografía. Utiliza un rayo láser móvil para trazar y selectivamente sinterizar un material compuesto polímero en polvo y/o metal en sucesivas secciones transversales de la pieza tridimensional. En la figura 9 se muestran las partes y la operación de la sinterización selectiva por láser.

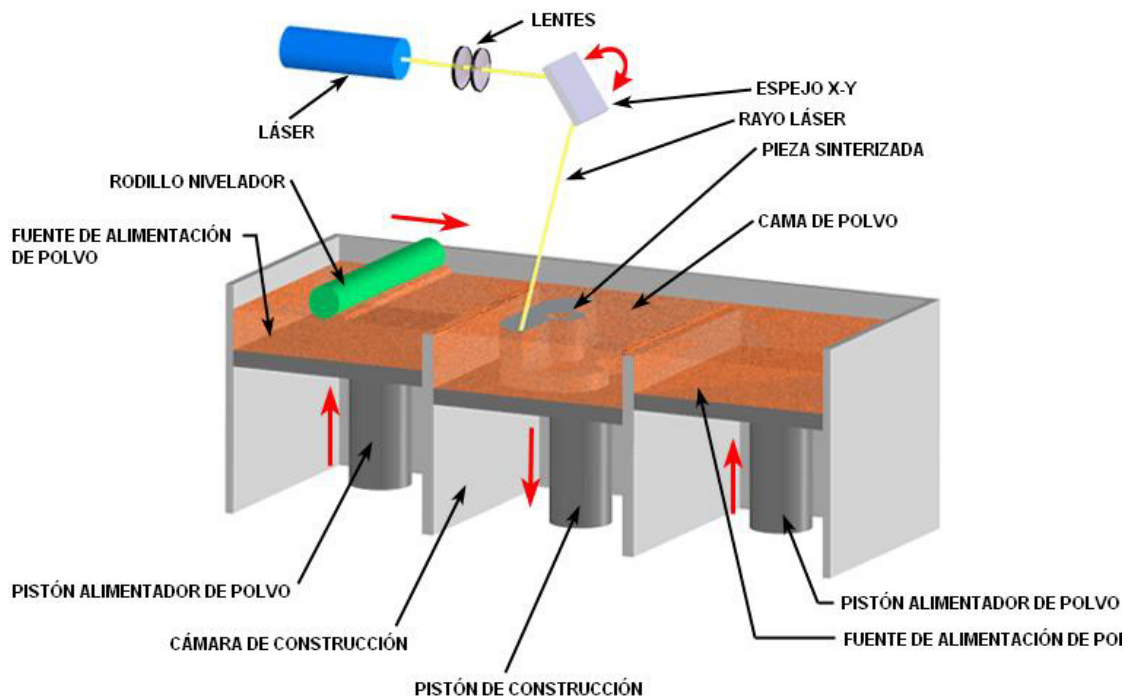


Figura 9. Partes y operación de la máquina para la generación de prototipos mediante sinterización selectiva por láser.

Como en todos los procesos de prototipado rápido, las partes son construidas sobre una plataforma que ajusta la altura para que sea igual al espesor de una capa construida. Polvo adicional es depositado sobre cada capa solidificada y sinterizada. Este polvo es transportado por el rodillo nivelador desde la fuente antes de construir una capa nueva. El polvo es mantenido a una alta temperatura para que se funda fácilmente al exponerse al láser.

A diferencia de la estereolitografía las estructuras de soporte no se requieren, ya que el exceso de polvo en cada capa actúa como soporte para la pieza que está siendo construida.

Con el material de compuesto metálico, el proceso solidifica el polímero de base alrededor del polvo de metal (generalmente de 100 micras de diámetro), una capa a la vez, formando la pieza. Una vez terminada la pieza es colocada en un horno a temperaturas que exceden los 900 °C, en donde el polímero usado para la unión es quemado y la pieza se le agrega bronce para mejorar su densidad. El proceso de quemado y agregado generalmente lleva un día, después del cual se le puede maquinar y trabajar en el acabado. Recientes mejoras en la precisión y resolución, han reducido la necesidad de un maquinado secundario y trabajos de acabado.

Este proceso permite usar una amplia gama de materiales, incluyendo nylon, SOMOS (tipo plástico), truform (investment casting) y el compuesto metálico que se describía anteriormente.

Entre las aplicaciones que tiene este método de prototipado están las pruebas de forma y ensamble, pruebas funcionales, piezas sin tanto detalle, piezas con ensambles de enganche o bisagras, entre otros.

▪ Impresión Tridimensional

La tecnología de impresión tridimensional fue desarrollada en el Massachusetts Institute of Technology y se vendió el desarrollo a varias compañías. El proceso es similar a la Sinterización selectiva láser, pero en lugar de usar un láser para sinterizar el material, se utiliza un cabezal inyector que deposita adhesivo líquido que une el material. En la figura 10, se muestran las partes principales de una máquina de impresión tridimensional.

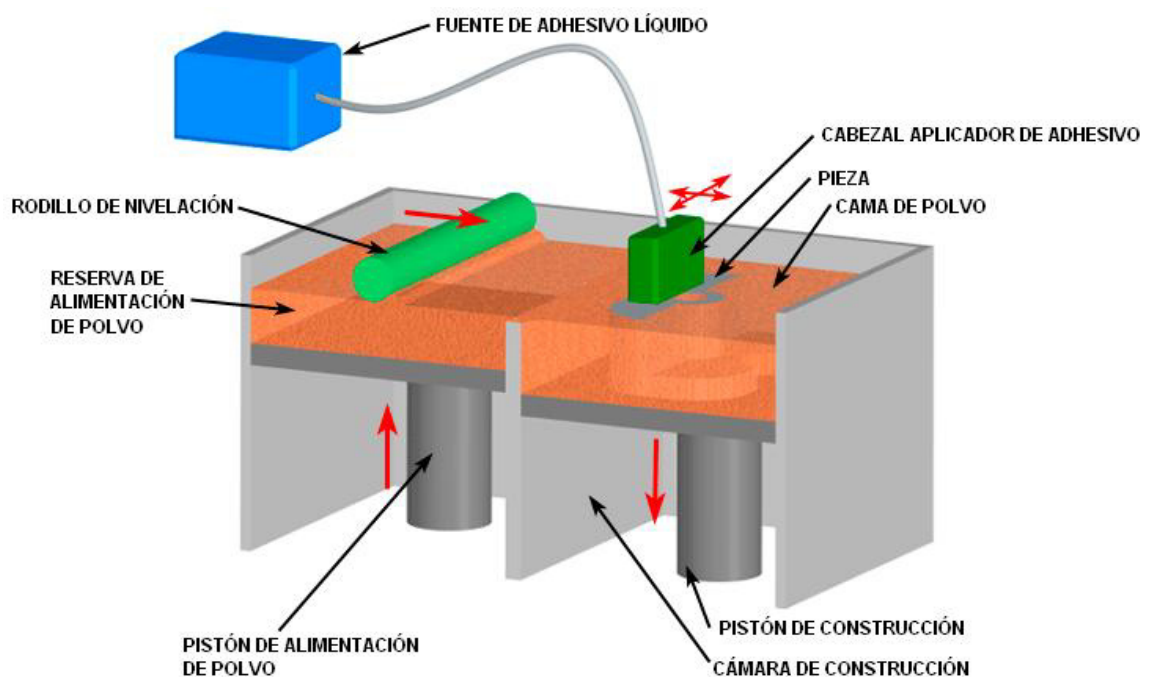


Figura 10. Partes y funcionamiento del proceso de impresión tridimensional.

Las opciones del material pueden ser polvos metálicos o cerámicos, los cuales son poco costosos comparándolos con otros procesos aditivos. Éste proceso ofrece la ventaja de una rápida construcción, de 2 a 4 capas por minuto, sin embargo, la precisión, el acabado superficial y la resistencia de la pieza no son tan buenas como las piezas obtenidas por otros procesos aditivos.

Éste proceso es usualmente utilizado para la construcción de modelos conceptuales, aunque pruebas funcionales pueden realizarse pero sin llevar al extremo la resistencia física de la pieza.

La impresión tridimensional empieza con la fuente de polvo siendo levantada por un pistón y un rodillo de nivelación distribuye una capa muy delgada de polvo sobre la superficie de la cámara de construcción. Una cabeza impresora multicanal deposita un líquido adhesivo a regiones específicas de la superficie de polvo. Estas regiones de polvo se unen por el adhesivo y forman una capa de la pieza. El polvo que no recibe adhesivo sirve de soporte de la pieza durante la construcción.

Después de que una capa es construida, la plataforma de construcción es descendida y una nueva capa de polvo se añade, se nivela y la impresión, añadiendo adhesivo, de una nueva sección se repite.

Una vez la pieza está completa, el polvo que se encuentra suelto puede ser removido y se retira la pieza. Casi siempre las partes hechas con éste método son sumergidas en algún tipo de sellador para aumentar su resistencia y mejorar su apariencia superficial.

Entre las aplicaciones se encuentran los modelos conceptuales, pruebas funcionales (limitadas), modelos para ser pintados o evaluar su apariencia, entre otros. Día a día es más común ver el desarrollo e integración de los prototipos rápidos en aplicaciones cada vez más extraordinarias, donde ya no se limitan a ser muestras físicas, sino que se han convertido en una importante arma para aplicaciones médicas, refacciones de emergencia, vaciado de moldes y demás usos donde un buen desempeño físico es indispensable.

Si bien hasta ahora existe una interesante variedad de métodos para la fabricación de prototipos rápidos, el desarrollo a partir de ahora estará dado

por nuevas generaciones de materiales para su manufactura donde un rango de mayor resistencia o texturas llevará a estos productos a nuevas áreas.

Actualmente los sistemas de producción de prototipos rápidos ya están siendo utilizados como medios de manufactura rápida, para productos cada vez más exigentes.

•2.6 Maquinado

Los procesos de manufactura son la combinación de personal, materia prima, herramientas y máquinas para la obtención de un producto final. Uno de los procesos de manufactura más usados en la producción de piezas metálicas es el corte con desprendimiento de material, conocido como maquinado o mecanizado. Es decir, una herramienta con filos cortantes fabricada de un material resistente al desgaste y a las altas temperaturas, que penetra la superficie de una pieza con desprendimiento de material en forma de viruta, hasta obtener el producto final. Los parámetros fundamentales en un proceso de corte son: velocidad de corte, avance y profundidad.

Actualmente las máquinas herramientas usadas en los procesos de mecanizado vienen altamente automatizadas, reduciendo las necesidades de mano de obra para ciertos procesos productivos. Estas máquinas se pueden programar usando el control numérico computarizado (CNC), dichos programas contienen la información tecnológica sobre el proceso de mecanizado. También se pueden programar usando la ayuda del diseño asistido por computador (CAD), donde se diseñan las partes a mecanizar. Posteriormente pasan a un programa de manufactura asistida por computador (CAM) donde se realiza la simulación del proceso de corte, seleccionando las herramientas, materiales y parámetros de corte. Los programas CAD/CAM ayudan a realizar programas CNC complejos. La industria metalmecánica está adquiriendo máquinas herramientas de última tecnología, pero muchas de éstas no son aprovechadas al máximo por las empresas, debido a que las velocidades no se optimizan y los materiales de las herramientas de corte no

siempre son los más adecuados. Las herramientas de corte deben cumplir con tres propiedades importantes: tenacidad, dureza en caliente y resistencia al desgaste.

2.6.1 Maquinado de moldes

El moldeo de arena es uno de los métodos de fundición más utilizados a nivel mundial, por razones que ya se han tratado con anterioridad, sin embargo, en cuanto a la automatización del proceso, este ha logrado avanzar muy poco, lo más relevante, hasta hace unos años eran las máquinas de moldeo, que básicamente hacían mezclas de arena y compactaban, de acuerdo a la calidad de arena establecida como óptima, sin embargo el método se basaba en el mismo principio. Con la aparición de equipos CNC, el campo de la fundición se vio beneficiado. La utilización de estos equipos, capaces de generar formas geométricas complejas, listas para ser vaciadas, trayendo como consecuencia la eliminación del uso de los “patrones o modelos”. Este proceso se basa en el maquinado de moldes, utilizando herramientas de carburo, o de punta de diamante, desafortunadamente, el costo de estas es elevado y su desgaste es considerable, el maquinado se torna complicado, pues otros factores se ven involucrados, como por ejemplo la sujeción de los moldes, ya que cualquier variación en el posicionamiento del molde, puede arrastrar problemas dimensionales en las piezas a fabricar y los grados de libertad o ejes que posea el equipo en cuestión.

Una manera de mejorar el desempeño del proceso es con la implementación del CAD/CAM ya que los diseños facilitan la fabricación de los moldes.

Cabe señalar que el maquinado de moldes de arena, es más complicado de lo que se podría pensar, es por eso que dicho método está pensado en la fabricación de piezas únicas o de bajo volumen de producción, a pesar de ello, deben considerarse los mismos factores como en cualquier otro maquinado, la sujeción de los moldes, los parámetros de maquinado y las

formas de “atacar” dicho molde, por mencionar algunas, sin embargo, los avances en cuanto a la mejor forma de aplicar el proceso no son precisamente abundantes, por lo que, generar un método que pueda ser aplicado a cualquier proceso sin importar las geometrías, ni el tamaño de los moldes, sería de gran utilidad. Para esto se requiere encontrar una mezcla estándar que sea capaz de comportarse de manera similar con distintos moldes sin importar las condiciones en las que este se encuentre.

Capítulo 3

Análisis Experimental

Maquinabilidad puede definirse como la facilidad que ofrece un material para ser mecanizado por arranque de viruta, en el caso de un molde de arena, no hay propiamente viruta cortada, sino más bien un desprendimiento de arena, una especie de erosión, que mejora conforme el molde presenta mayor estabilidad y resistencia.

Tomando en cuenta lo anterior se espera que con las pruebas que se describirán a lo largo de este capítulo, se pueda encontrar una mezcla que permita el maquinado de geometrías complejas en moldes de arena. Moldes que servirán para el vaciado de piezas en superaleaciones.

3.1 Descripción del Proceso

El desarrollo experimental de este proyecto de investigación trata sobre la fabricación de moldes de arena, unidos químicamente por medio de la utilización de resinas, para posteriormente ser maquinados y utilizados en fundición para lograr la adquisición de piezas complejas en superaleaciones. Para esto se tiene contemplado trabajar con dos tipos de resinas autofraguantes y dos tipos de arenas sílice con diferentes tamaños de grano y así determinar cuál de las mezclas utilizadas en los moldes fabricados tiene mejor desempeño durante el proceso de maquinado.

3.1.1 Descripción de las arenas

Una vez recibidas las muestras de arena con las que se trabajó, se procedió a su caracterización para poder diferenciarlas, ya que ambas arenas silicas, son teóricamente de grano redondo, es por eso que se realizó una

clasificación granulométrica de los dos tipos de arena sílica: la primera de ellas de 60 +/-5 AFS (W530) y la otra de 80 +/-5 AFS (Oklahoma).

Para describir las formas de grano se han adoptado los términos redondo, angular y sub-angular (compuesto). Un depósito de arena puede estar compuesto de un solo tipo de forma de grano de arena o una combinación de varios.

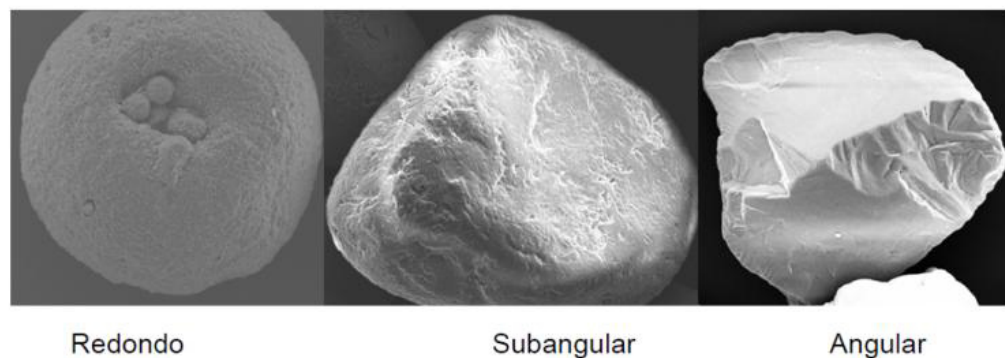


Figura 11. Morfología típica de los granos de arena.

La forma del grano afecta las propiedades físicas de un molde (figura 11). Una arena con grano redondo requiere menores cantidades de aglomerante, comparada con las arenas que tienen forma angulares, esto se debe a que en las arenas redondeadas fluyen mejor y con esto conforman moldes y corazones más densos. Las arenas angulares son las de menor uso dentro de las fundiciones, ya que presentan muchos problemas de fracturas en moldes y corazones por la configuración del grano, además las arenas de forma angular tienen la desventaja de que los corazones muestran baja permeabilidad al acomodarse las partículas de una forma tal que obstruyen la salida de los gases de combustión de la resina.

La realización de la granulometría a las muestras de arena, es un ensayo muy simple, pues consiste en hacer pasar una muestra de arena a través de diez tamices que cuentan con una malla graduada y que están

ordenados con respecto a la graduación de la malla, es decir de mayor a menor mallado, tal como se indica en las figuras 36 y 37, que se encuentran en el capítulo siguiente. La caída de los granos se logra con ayuda de una máquina tamizadora que genera vibraciones (figura 12).



Figura 12. Tamizadora para la realización de la separación de granulométrica de la arena.

3.1.2 Descripción de las resinas

▪ Resina ecolotec

En lo que se refiere a las resinas, al ser estas de origen comercial, sólo se les analizó en lo que se refiere a su comportamiento una vez que fueron mezcladas con arena, tal es el caso de la prueba de resistencia a la tensión, que se realizó con las distintas mezclas de arena.

El proceso ecolotec es un sistema que consta de dos partes:

a) Resina ecolotec, esta es base agua es una resina alcalina fenol formaldehído.

b) Gas de curado. Dióxido de carbono (CO₂).

Ningún otro aditivo es requerido.

La resina ecolotec contiene un agente de reacción en estado complejo. Este proceso también conocido como proceso de caja fría, ya que no requiere incrementar la temperatura del herramental utilizado para el curado, sucede cuando el gas CO₂ pasa a través de la mezcla de arena acelerando la reacción, ya que el pH de la misma es disminuido y el agente de reacción es activado. El fraguado de la resina se lleva a cabo, resultando en el curado inicial y desarrollándose la resistencia inicial fuera de la caja (o molde). Esta resistencia puede continuar incrementándose posteriormente a las 24 horas, debido a que el gas utilizado en la reacción química (CO₂) está presente en el aire y continua endureciendo las capas más superficiales del molde.

Para tener una organización más clara de los insumos adquiridos, estos se clasificaron de la manera más práctica posible y tomando en cuenta las combinaciones posibles de arena y resina con las que se estaría trabajando para encontrar la que brindaría un mejor comportamiento durante el proceso de maquinado, por cual deben de considerarse los parámetros iniciales ideales para utilizar el proceso ecolotec, que son mencionados en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del proceso ecolotec.

• PRESION DE CO ₂	20 PSI
• TEMPERATURA DE CO ₂	20 A 25°C
• RANGO DE FLUJO DE CO ₂	8 Lts/Min
• TIEMPO DE FLUJO	10 A 60 SEG*
• RESISTENCIA (min/Max)	20/110 (N/cm ²)
• CONSUMO DE GAS	8.5%
• DENSIDAD DE LA RESINA	1.33 gr/cm ³

Vida de banco de la mezcla de arena.

- El curado apropiado de la mezcla, sólo se lleva a cabo cuando existe una correcta aplicación del dióxido de carbono. El dióxido de carbono presente en el aire, es capaz de endurecer la mezcla superficialmente, sin embargo, el resto de la arena permanece blanda. Se recomienda mantener la mezcla de arena tapada para minimizar la deshidratación atmosférica.
- La vida de banco aproximada es de :
 - Arena a 15°C, puede ser útil no más de 5 horas.
 - Arena a 32°C, puede ser útil no más de 1 hora.

Almacenamiento de Corazones

- Gasificar adecuadamente los corazones fabricados con resina ecolotec, asegurara una vida de almacenamiento prolongada. Un gaseado incorrecto de los corazones, generará friabilidad, es decir, que los corazones se desmoronaran fácilmente, así como una pérdida de resistencia en almacenamiento.
- Durante el almacenamiento se puede producir un cambio de color de la arena como resultado de la oxidación atmosférica (color amarillento). Este cambio no afecta las propiedades del corazón.
- Se tiene registrado que un corazón mantiene sus propiedades durante 4 semanas, tiempo durante el cual puede ser usado sin problemas, si el tiempo de almacenado sobre pasa las 4 semanas, se deberá evitar su uso, pues el corazón tiende a tomar un aspecto más oscuro, es entonces que se dice que esta “quemado”, pues propiedades como la dureza o resistencia a la tensión se ven reducidas.

Posterior a la entrega de las muestras por parte de la empresa, se procedió a la clasificación de las mismas, en las que se optó, por organizarlas de acuerdo al tipo de arenas con los porcentajes de resina a utilizar, además

de utilizar también la mezcla tipo pepset, porque aunque su uso en la empresa no es alto, era bueno realizar pruebas con ella, para poder saber si es conveniente su utilización en los procesos de maquinados.

▪ **Resina pepset**

El proceso pepset (Ask Chemicals) es un sistema fenólico sin estufado, es decir, solidifica en frío y es utilizado para la fabricación de moldes y corazones que consta de tres componentes, dos resinas y un catalizador.

El porcentaje de catalizador debe ajustarse de acuerdo a la cantidad de resinas utilizadas para garantizar el tiempo de trabajo de arena mezclada.

Una mezcla típica arena revestida de aglutinante pepset contendrá aproximadamente 1,25% de aglutinante, con respecto al peso de arena en una proporción de 60:40 (60 partes Resina A y 40 partes Resina B). La cantidad deseada de catalizador pepset (3-9% basado en el peso la parte A) debe ser pre-mezclado en la parte I de resina. La adición simultánea de resina A (con catalizador) y resina B se puede hacer sin afectar significativamente la velocidad de curado y la resistencia. Sin embargo, las adiciones separadas (resina b, después la resina a) a la arena se consideran la mejor práctica.

Tabla 4 Propiedades físicas de las resinas Pepset

Resina A	Resina B
<ul style="list-style-type: none"> • Color: Ámbar • Punto de inflamabilidad: 150°F • Densidad a 1.098 g/cm³ • Gravedad específica: 1.095 • Índice de refractariedad: 1.5498 • Viscosidad a 25°C 191cps • Agua 0.32% • Formaldehído: 0.0% • Fenol: 6.25% • Naftaleno: 2.73% 	<ul style="list-style-type: none"> • Color café • Punto de inflamabilidad: 150°F • Densidad a 25°C 1.090 098 g/cm³ • Gravedad Específica: 1.091 • Índice de refractariedad: 1.5790 • Viscosidad a 25°C 22cps • Naftaleno: 3.04%

Los componentes pepset se deben almacenar lejos del calor y las llamas en un entorno aislado y temperatura controlada entre 15°C y 30°C

(medio ambiente). En estas condiciones, los componentes de la mezcla pueden ser utilizados a lo largo de un año.

Después de recibir las muestras de resina y arena, se optó por clasificarlas y así facilitar su estudio, la clasificación utilizada esta descrita en la tabla siguiente.

Tabla 5. Porcentajes utilizados para la preparación de mezclas de arenas

			Mezclas Ecolotec con las diferentes concentraciones utilizadas (porcentajes)			Mezcla Pepset
			Baja	Media	Alta	UNICA Por cada 25 kg de arena 200ml de resina 1 y 300ml de resina 2
CLAVE			1.8%	2.4%	3.0%	
TIPO DE ARENA	OKLAHOMA (75-85 AFS)	A1	A1B	A1M	A1A	A1R
	W530 (55-65 AFS)	A2	A2B	A2M	A2A	A2R

Cabe señalar que la mezcla ecolotec fue clasificada con tres diferentes concentraciones, mientras que la Pepset, solo una mezcla fue seleccionada, esto debido a que la mezcla Pepset, está actualmente en desuso, por lo que no se consideró adecuado utilizarla en un número mayor de concentraciones.

3.1.3 Diseño de probeta experimental

Una vez que se seleccionaron los porcentajes de resina, se procedió a elaborar el diseño que tendría la “probeta” sobre la cual se harían las operaciones de maquinado, dicha probeta serviría para evaluar el moldeo y posteriormente el maquinado, para esto, se propusieron tres operaciones básicas de maquinado: dos barrenos, un ranurado y un biselado (figura 13).

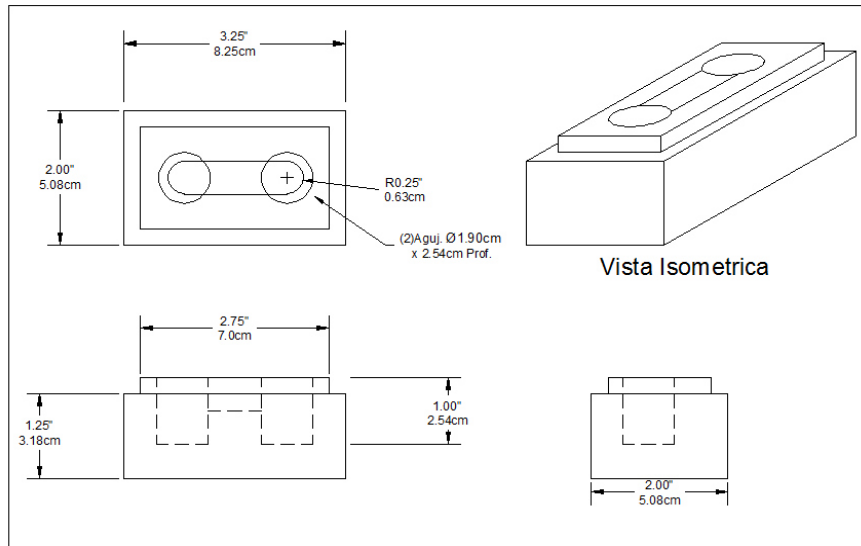


Figura 13. Diseño elegido. Cuenta con dos barrenos, un ranurado y un biselado.

3.1.4 Diseño del molde

El diseño elegido debe contar con la mayor cantidad de operaciones de maquinado, para ver su comportamiento, además de tener un tamaño que permitiera fabricar un gran número de probetas para aumentar la repetitividad de las operaciones.

Posterior a la selección del diseño de probeta, fue la elaboración de la adobera (figura 14) que serviría de molde para poder fabricar las probetas.

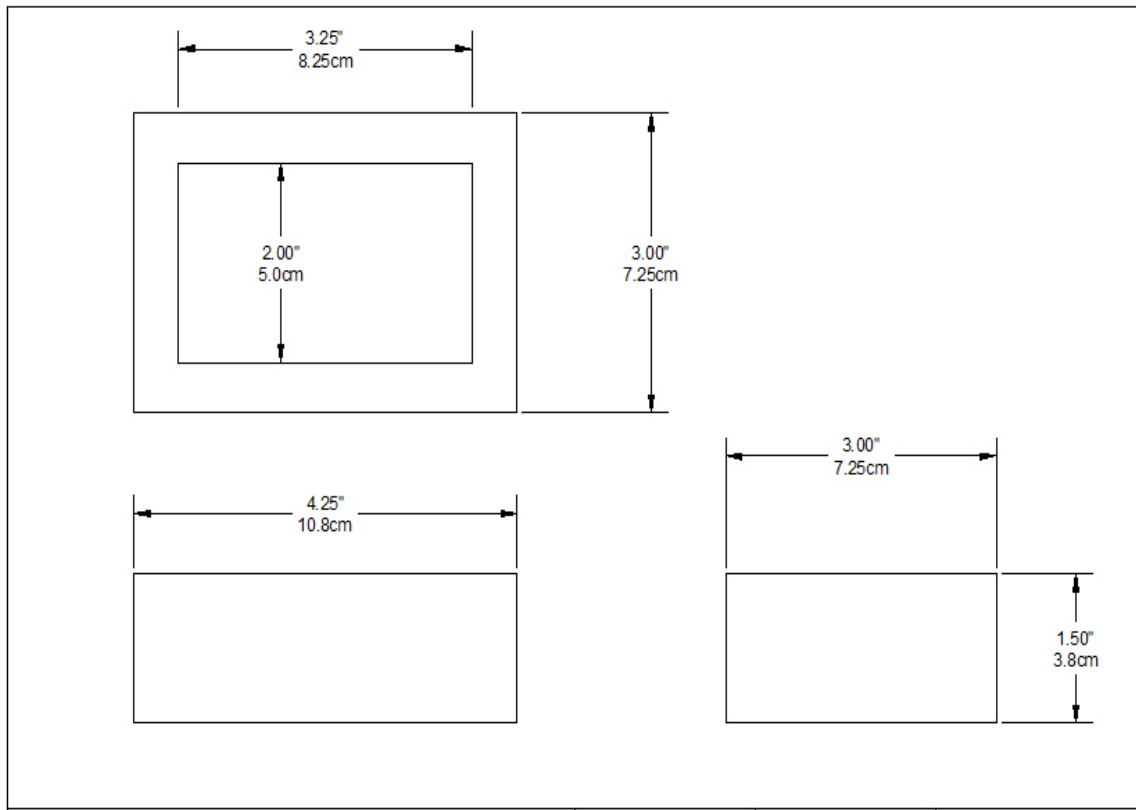


Figura 14. Diseño básico de la adobera (también conocido como molde o caja) con el que se fabricaron las probetas.

3.2 Diseño de Experimentos

Después de conocer todos los materiales a utilizar se definieron las pruebas que ayudarían a determinar las propiedades de las mezclas que servirían de la manera más eficiente a cumplir con el propósito planteado, para esto y como pruebas de interés, la primer prueba consistió en la determinación del tiempo óptimo de mezclado de la arena, además de tiempos de mezclado se pretendía encontrar el tiempo ideal de gasificación (esto para la mezclas del tipo ecolotec, proceso que se abordara más adelante), así como los tiempos necesarios para un sinterizado óptimo. Una vez encontrando la mezcla ideal, se deberán encontrar los parámetros de maquinado que garanticen el mejor desempeño de los moldes durante este proceso.

3.2.1 Pruebas de Mezclado

El desarrollo experimental tomó como base el valor nominal usado por la empresa, 2.4% de resina ecolotec, (el porcentaje de resinas pepset utilizados, se describe en la tabla 5) para la fabricación de corazones para moldes. La variabilidad en los porcentajes de resina utilizados son los descritos en la tabla 5, se tomo como base los porcentajes usados bajo condiciones normales en la empresa, sin embargo para poner a prueba la maquinabilidad de dichos moldes, era necesario hacer pruebas con distintas concentraciones de resina, es por eso que se decidió, utilizar un porcentaje arriba del valor nominal y uno por debajo del mismo.

A causa del uso de dichos valores no se tenía la certeza de que el molde se comportara adecuadamente durante el proceso de maquinado, como lo haría siendo un corazón. Cabe señalar que, estos porcentajes corresponden al peso de la resina a utilizar con respecto al total de arena que se desea mezclar, tomando en cuenta que las resinas a utilizar tienen una densidad aproximada de 1.33 gr/cm^3 por lo que el porcentaje en peso será mayor a la cantidad en mililitros. Todo esto con respecto a la fabricación de corazones con la resina A1 (ecolotec).

Por otro lado las resinas pep-set sólo cuentan con una concentración para la experimentación (ver tabla 5), es decir que se trabajó únicamente con los porcentajes que indico la empresa, esto debido a que es una resina que se encuentra en desuso, pero que en caso de arrojar resultados positivos durante el proceso de maquinado podría ser utilizada en mayor medida para la fabricación de moldes.

El desarrollo de moldes consiste en pesar la cantidad de arena a mezclar, pesar la cantidad de resina equivalente al porcentaje a utilizar de acuerdo a la tabla de porcentajes, descrita en la tabla 5, posteriormente vaciar la arena en el contendor del equipo de mezclado que se ha utilizado y encenderlo con la arena dentro, para después ir vertiendo la resina poco a poco, hasta haberla agregado por completo y dejar la mezcla revolviéndose

durante cuestión de minutos (figura 16), se tomaron tiempos para determinar el tiempo optimo que debía tener la mezcla. Antes de empezar la preparación de arena, se debe tener aseguradas las adoberas de madera, tal como se puede apreciar en la figura 15.



Figura 15. Ensamble de adoberas de madera, antes de la preparación de arena.



Figura 16. Se debe medir con precisión la cantidad de resina a utilizar, antes del mezclado. A la izquierda medición del peso de la resina, a la derecha mezcla de arena con ayuda de la batidora industrial.

Posterior al mezclado, viene la etapa de moldeo, el cual se hizo emulando el proceso de fabricación de corazones, es decir, primero se agrega la arena en la cavidad de la caja, en este caso el molde de madera cerrado, para después compactar la arena, con un peso muerto y terminar retirando el exceso de arena con alguna espátula.

Para terminar con los moldes ecolotec y lograr que estos solidifiquen adecuadamente (figura 18), se debe aplicar un flujo de gas CO_2 (figura 17) con ayuda de una manguera que en la punta deberá llevar algún herramental que permita que toda la superficie del molde sea abarcada por el gas.



Figura 17. Tanque de CO_2 utilizado para la gasificación de los moldes y lograr la solidificación de los mismos.

Se hicieron pruebas con la adición de gas a diferentes flujos y con diferentes tiempos de gaseado, esto con el único fin, de encontrar la combinación mínima óptima de flujo y tiempo de gasificado.



Figura 18. Forma de los bloques de arena una vez desmoldados.

En lo que respecta al proceso de mezclado pepset, el método de preparación es distinto, pues esta mezcla utiliza una combinación de resinas y un catalizador para poder llevar a cabo el sinterizado.

Se utiliza 200 ml de resina 1 y 300 ml de resina 2 por cada 25kg de preparación, más el 1.2% del catalizador con respecto al peso de la resina 1, y antes de agregarlos a la arena tanto resina 1, como catalizador se mezclan.

Se inicia el proceso de mezclado y se agrega poco a poco la mezcla de resina 1 y catalizador hasta agotar el contenido, una vez terminado se agrega la resina 2. A diferencia del proceso Ecolotec, esta mezcla debe ser moldeada rápidamente, ya que al tener el catalizador agregado en la misma mezcla, los

tiempos de sinterizado se aceleran, ya que no necesita la presencia de un gas como es el caso del otro proceso.

Para el moldeado de esta mezcla, se realizaron el mismo tipo de moldes de madera, pues se quería replicar las piezas en cada aspecto, para poder determinar con certeza cuales piezas se comportaban mejor en los procesos posteriores, de maquinado y vaciado.

3.2.2 Pruebas de resistencia a la tensión (AFS Tensile Strength Testing)

Para tener la certeza de cuál sería la mezcla que adquiriría mayor resistencia después de la fabricación de la arena, se realizaron una serie de pruebas para medir la resistencia a la tensión, dicho ensayo sirve para medir la resistencia de arenas como Cromita, Sílica y Olivina, se realizó en una máquina universal Simpson Gerosa (figura 19).

Las pruebas para medir la resistencia de las mezclas sirven precisamente para poder comprobar que tan resistentes serán los moldes una vez que se les apliquen esfuerzos, ya sea por la manipulación de los mismos, o por el flujo de metal por sus canales de alimentación.

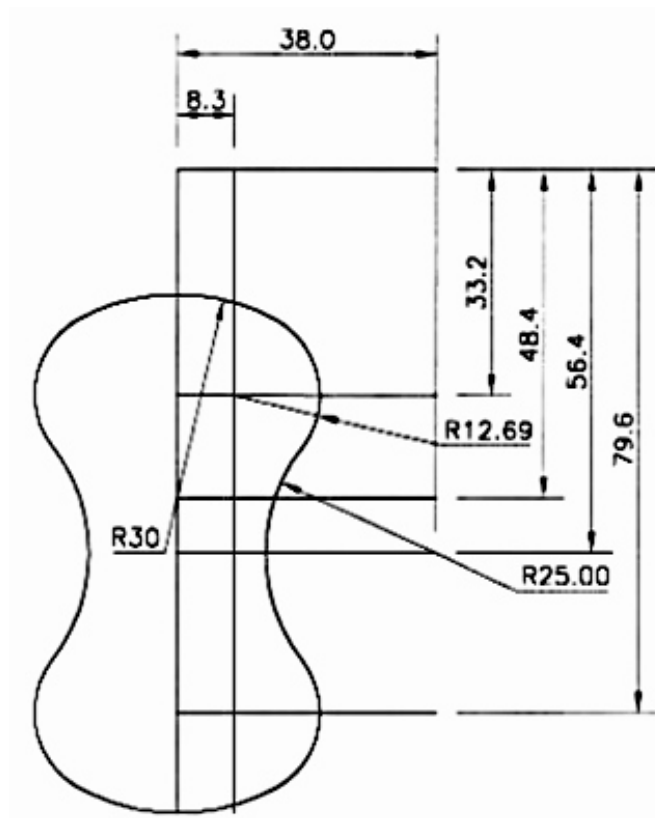


Figura 19. Máquina Universal Simpson Gerosa

Esta prueba está diseñada para evaluar el desarrollo de resistencia de las probetas comúnmente conocidas como “Huesitos de Perro” (Dogbones, en inglés) después de haber sido fabricados y almacenados en condiciones controladas de humedad y temperatura. Todas las probetas requeridas en esta prueba son fabricadas con mezcla fresca, es decir, aquella que cumpla con una fabricación menor a 5 horas si se tiene una temperatura ambiente menor a 20°C o menor a una hora, si se tiene una temperatura mayor a 25°C; una vez preparados, estos se dejan reposar durante 6 horas antes de realizar el ensayo de tensión (como estudio previo, la empresa Cronite estableció como 6 horas el tiempo óptimo para la utilización de los corazones fabricados).

Se elaboraron 9 probetas tipo huesito o guitarra, ver figura 20, con cada una de las mezclas de arena y resina de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente de preparación de arena y posteriormente se dejaron reposar el tiempo establecido (6 horas), para después poder medir la resistencia de cada tipo de mezcla.

Para realizar la prueba se debe contar con un molde para la fabricación de la probeta estándar.



AREA = 25.230mm²
PERIMETRO = 214.314mm

Figura 20. Dimensiones de la probeta tipo guitarra para pruebas de resistencia a la tensión.

3.2.3 Pruebas preliminares de Maquinado

Una vez que las pruebas de resistencia fueron concluidas y se obtuvieron los primeros resultados de resistencia, se procedió al maquinado, esto sirvió para comprobar la relación entre la resistencia de las mezclas y la maquinabilidad de los moldes.

Las pruebas de maquinado fueron llevadas a cabo en un laboratorio de Máquinas y Herramientas dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Dichas pruebas fueron realizadas en una fresadora marca SAIMP modelo FU-1 de 220 volts y 50 ciclos de tipo convencional (figura 21) propiedad de la Universidad.



Figura 21. Fresadora Marca SAIMP modelo FU-1.

Para realizar las pruebas fueron adquiridas brocas de diferentes materiales para poder establecer cuáles serían las óptimas para desarrollar el proyecto, estas fueron brocas de acero convencional y de carburo de tungsteno de acuerdo a las medidas que señalaba el diseño experimental, ver figura 22.



Figura 22. Las brocas utilizadas (La oscura tiene una medida de 0.75" de diámetro y es de Carburo de Tungsteno, la otra es de Acero convencional y tiene un diámetro de 0.5").

Para poder llevar a cabo las pruebas se establecieron dos parámetros considerados críticos que debían ser encontrados, revoluciones por minuto (rpm) y velocidad de avance, con los cuales se pretende estandarizar el proceso y definir aquellas óptimas para el mismo.

Se realizaron pruebas de maquinado (figura 23) necesarias con el fin de encontrarlas, es por eso que se inició con los valores mínimos que permitía el equipo y en base al maquinado de moldes, estos valores se iban modificando, conforme se iban ajustando los valores, se iban descartando velocidades de giro y avance.

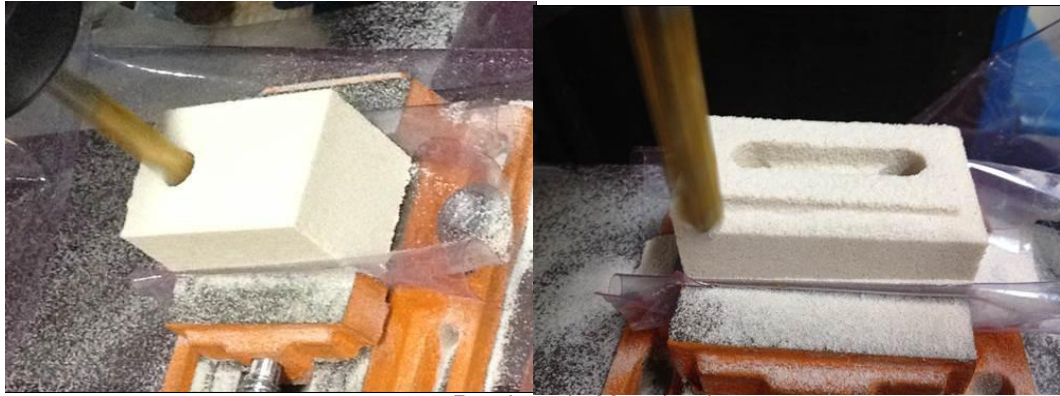


Figura 23. Pruebas de Maquinado

Una vez concluidos los primeros bloques (figura 24), aquellos que presentaron el mejor comportamiento durante el proceso de maquinado serían utilizados en el proceso de vaciado.



Figura 24. Ejemplos de bloques maquinados.

3.2.4 Pruebas preliminares de vaciado (Universidad/Aluminio)

Para poder observar el comportamiento de los moldes de arena ya maquinados, con metal fundido, se realizaron pruebas de vaciado con aluminio (figura 25), a pesar de las claras diferencias entre el aluminio y las superaleaciones de la empresa Cronite, estas pruebas denominadas preliminares, fueron relevantes para dar una idea del acabado superficial de las piezas que ofrecen los moldes maquinados.

Estas pruebas fueron realizadas en las instalaciones de la Universidad, con un horno de gas, propiedad de la FIME y fueron realizadas con el único fin de comprobar la resistencia de los moldes al entrar en contacto con un metal fundido, en este caso aluminio, así como el acabado superficial obtenido con dichos moldes.



Figura 25. Horno de gas y cucharón utilizados para el vaciado de las piezas en Aluminio.

Para el proceso de vaciado de las piezas en Aluminio se fabricaron un total de 15 moldes (figura 26), con los cuales se abarcaban todas las combinaciones de resina y arena.

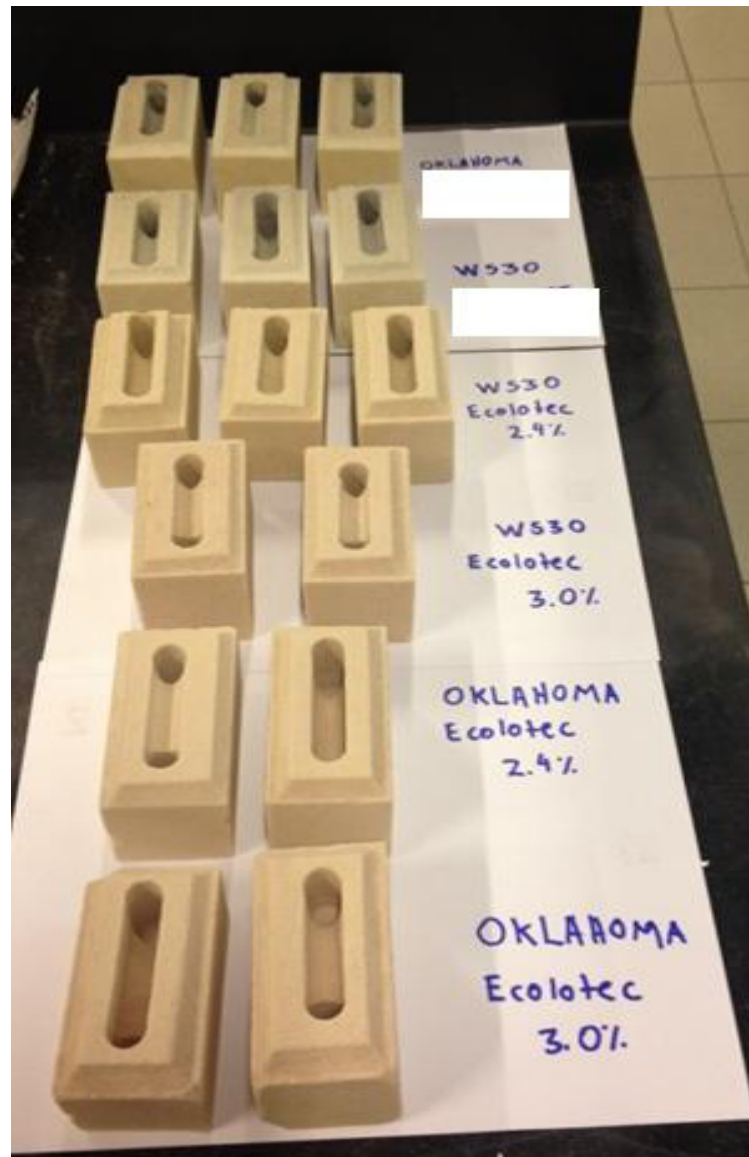


Figura 26. Total de moldes utilizados para la prueba de vaciado en aluminio.

Los moldes vaciados se presentan en la figura 27, todos ellos resistieron la acción del metal.



Figura 27. Moldes vaciados en Aluminio.

3.2.5 Pruebas de Vaciado (Cronite: Aleación Níquel-Cromo [37-18])

Después de ver el comportamiento de los bloques con el Aluminio, se planeó repetir la prueba, pero esta vez, en las instalaciones de la empresa y con una de las aleaciones que ellos manejan. Para esta prueba se fabricaron dos moldes por cada concentración dando un total de doce moldes. Dichos moldes fueron fabricados bajo el mismo método que los anteriores, para dejarse un día de reposo y ser vaciados al día siguiente en las instalaciones de la planta.

Para el proceso de vaciado se fijó la temperatura de 1480°C , como temperatura optima de llenado, por lo que el primer paso fue llevar el horno a dicha temperatura, para después mantenerla y comenzar así el vaciado.



Figura 28. Horno de inducción capacidad 550 kg.

Los bloques fueron llenados sin complicaciones. El primero de ellos vaciado a 1486°C , para finalizar el ultimo a 1481°C . El listado completo de los bloques y las temperaturas a las que fueron vaciados se detalla en la Tabla 6.



Figura 29. Medición de temperatura.

Tabla 6. Clasificación usada para el vaciado de los bloques con la aleación de la empresa y temperatura de vaciado (Aleación utilizada Ni-Cr).

Id	Clasificación (Tipo de Arena y Resina)	Temperatura Estimada de Vaciado	Temperatura Real	Comentarios
1	Mezcla	1480 °C	1486 °C	El primer bloque fue vaciado a una temperatura de 1486 °C, se lograron vaciar los 11 bloques y la temperatura final registrada fue de 1481 °C. Para esta prueba se fabricaron 2 bloques de cada tipo de arena.
2	A1R		1486 °C	
3	Mezcla	1480 °C	1485 °C	
4	A2R		1485 °C	
5	Mezcla	1480 °C	1485 °C	
6	A2M		1484 °C	
7	Mezcla	1480 °C	1483 °C	
8	A2A		1483 °C	
9	Mezcla	1480 °C	1483 °C	
10	A1M		1482 °C	
11	Mezcla	1480 °C	1482 °C	
12	A1A		1481 °C	

El primero de los bloques fue vaciado a una temperatura de 1486°C, que son 6 grados, arriba de la temperatura ideal de vaciado para la aleación en cuestión, pero que está dentro de del rango de las tolerancias permitidas (+10/-5°C), y en el último de los bloques la temperatura fue de 1481 °C.

Una vez que se vio el desempeño de los moldes con el aluminio se optó por hacer la prueba con una aleación que fuera manejada por la empresa, para esto se fabricaron los moldes con todas las condiciones que habían sido establecidas, durante la experimentación.

Para la prueba de vaciado se utilizaron 12 moldes, el tipo de mezcla y la cantidad de moldes usados de cada mezcla se enlistan en la tabla 8. Además de los moldes, para esta prueba se utilizó la aleación conocida como HR32, la cual es base Níquel-Cromo [37-18], y tiene una densidad aproximada de 7.5 g/cm³.



Figura 30. Moldes vaciados en la empresa.

La imagen de arriba muestra los bloques después de haber sido vaciados, cabe mencionar que estos fueron enfriados al aire libre, para después ser granallados y ahí fue donde se observó su acabado superficial,

comprobandose que es de una calidad similar a lo ya fabricado en el proceso de moldeo verde de la empresa.

Esta prueba se realizó para ver el comportamiento de las aleaciones en un molde de arena química, así como para realizar una comparación entre los acabados superficiales en estos y poder así determinar si se logra mejorar el acabado que otorgan las piezas que se fabrican en moldeo en verde.

3.2.6 Pruebas de Maquinado (Robot)

Después de encontrar una mezcla capaz de proporcionar la mayor estabilidad durante el proceso de maquinado en la fresa convencional, siguieron las pruebas con el robot, esto para asegurar que dicha mezcla efectivamente resiste las velocidades de avance y penetración del robot. Estas pruebas a fueron realizadas en las instalaciones de Cronite, esto con el fin de ver los resultados del proceso usando los equipos de la planta.



Figura 31. Molino utilizado para realizar las mezclas de arena.

Para este estudio se realizaron dos bloques de arena (uno de cada tipo de arena) de 30 cm de largo, 20 cm de ancho y 20 cm de alto, utilizando el 3 por ciento de la resina con tiempos de mezclado de cinco minutos, en la figura 32, podemos observar la preparación de esta mezcla.



Figura 32. Mezclado de arena con la resina y el catalizador.



Figura 33. Bloque de arena fabricado para maquinar con robot

Una vez que el bloque solidificó (figura 33), se abrió la caja para desmoldar y se dejó reposar durante 24 horas antes de proceder al maquinado. Esto para garantizar una correcta solidificación del molde; cuando el tiempo ha transcurrido se procedió a realizar el montaje del bloque en una base de madera, con esquinas que lo sujetan para evitar que se mueva durante el maquinado. El bloque y la base fueron colocados sobre una estructura metálica (figura 34) que brindaría el soporte necesario para asegurar el maquinado.



Figura 34. Montaje de bloque antes de ser maquinado.

Efectuado el careo del bloque (figura 35), se cargaron las rutas de maquinado, es decir, el programa que vincula el diseño a máquina con el lenguaje de programación utilizado para la manipulación del robot, pues contiene los parámetros de maquinado que utiliza el robot para realizar el trabajo.

A diferencia de los parámetros establecidos con la fresadora convencional usada en la universidad, el robot puede manejar valores más elevados, pues cuenta con una mayor potencia, es por eso que aunque se partió de los valores utilizados en la fresadora, estos se fueron modificando, hasta lograr cierta estabilidad en el proceso de maquinado con el robot.

Una vez que tanto el programa de la pieza a maquinar ha sido agregado al PLC del robot Marca KUKA con 6 grados de libertad, y los ejes han sido declarados, se procede al maquinado del molde.

Ejemplo de parámetros utilizados para la manipulación del robot en la prueba de maquinado antes descrita:

- Velocidad de avance de trabajo: 0.2 m/s
- Revoluciones de trabajo: 5000 rpm
- Velocidad de desplazamiento: 2m/s lineal.



Figura 35. Proceso de preparación del robot en la celda implementada. Localización de ejes.

A continuación se muestran imágenes del proceso de maquinado de una caja de corazón.

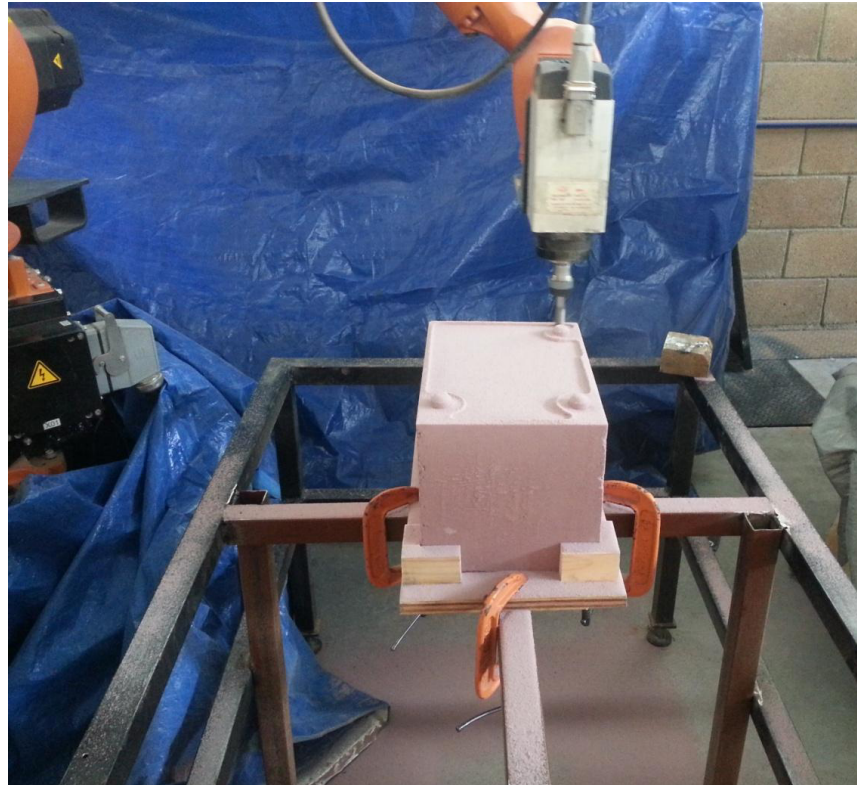


Figura 36. Inicio del proceso de maquinado.

El proceso de desbaste de la pieza (figura 36) duró aproximadamente tres horas, posterior a este se realizó la limpieza del molde para retirar el exceso de arena que este contenía (figura 37), además se llevó el robot al punto declarado como “origen” con la finalidad de hacer el cambio de herramienta, se retiró el herramental para desbaste y se colocó el que se utilizaría para darle el acabado al molde.

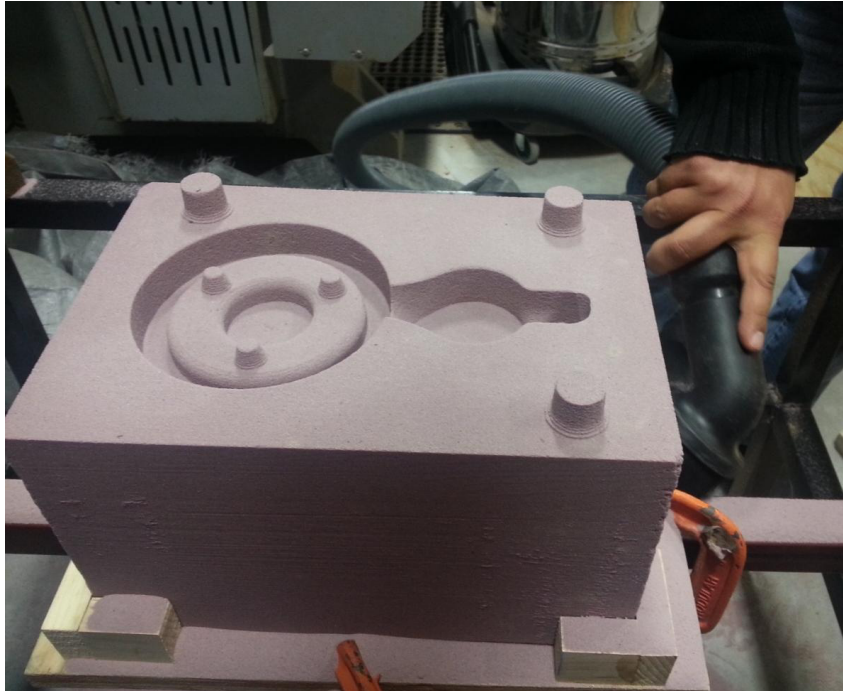


Figura 37. Limpieza del molde después del desbaste.

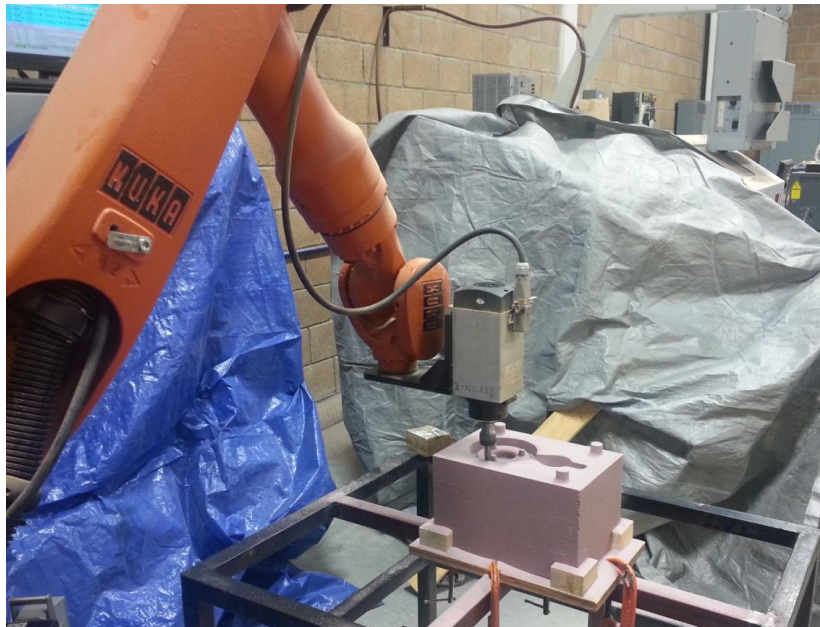


Figura 38. Maquinado de molde para dar acabado.

Para el acabado se utilizó una herramienta de corte de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, de cuatro filos y forma esférica, con una altura total de 3 pulgadas y una pulgada de área de trabajo (figura 38). La operación de acabado fue realizado por el robot en un tiempo de cinco minutos, la forma final de la pieza se muestra en la figura siguiente.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.0 Resultados obtenidos

En este capítulo se muestran los resultados conseguidos en base a la experimentación realizada a lo largo de esta investigación y que a su vez fue detallada durante el capítulo 3, entre los resultados logrados se encuentran; la obtención de una mezcla considerada ideal para la preparación de los moldes de arena, obteniendo la mayor resistencia a la tensión en la fabricación de dichos moldes y que ayudara a evitar las fracturas de los molde durante los traslados que este pueda sufrir, además se lograron identificar los moldes con mejor y peor desempeño durante las pruebas de maquinabilidad, es decir, que se encontró que existe una relación entre la resistencia de las mezclas con la capacidad de ser maquinado, las pruebas de vaciado en aluminio y las pruebas de vaciado realizadas en la empresa con una de las aleaciones que ellos manejan, así como las pruebas de maquinabilidad realizadas con la fresa convencional propiedad de la universidad y las que se realizaron en la empresa ya con el brazo robótico que fue adquirido.

Después de realizar la caracterización de las muestras de arena, esto por medio de análisis granulométricos de ambos tipos de arena sílica, se pudo comprobar la influencia del tamaño de los granos y de la morfología de cada tipo de arena en la obtención de la mezcla a utilizar.

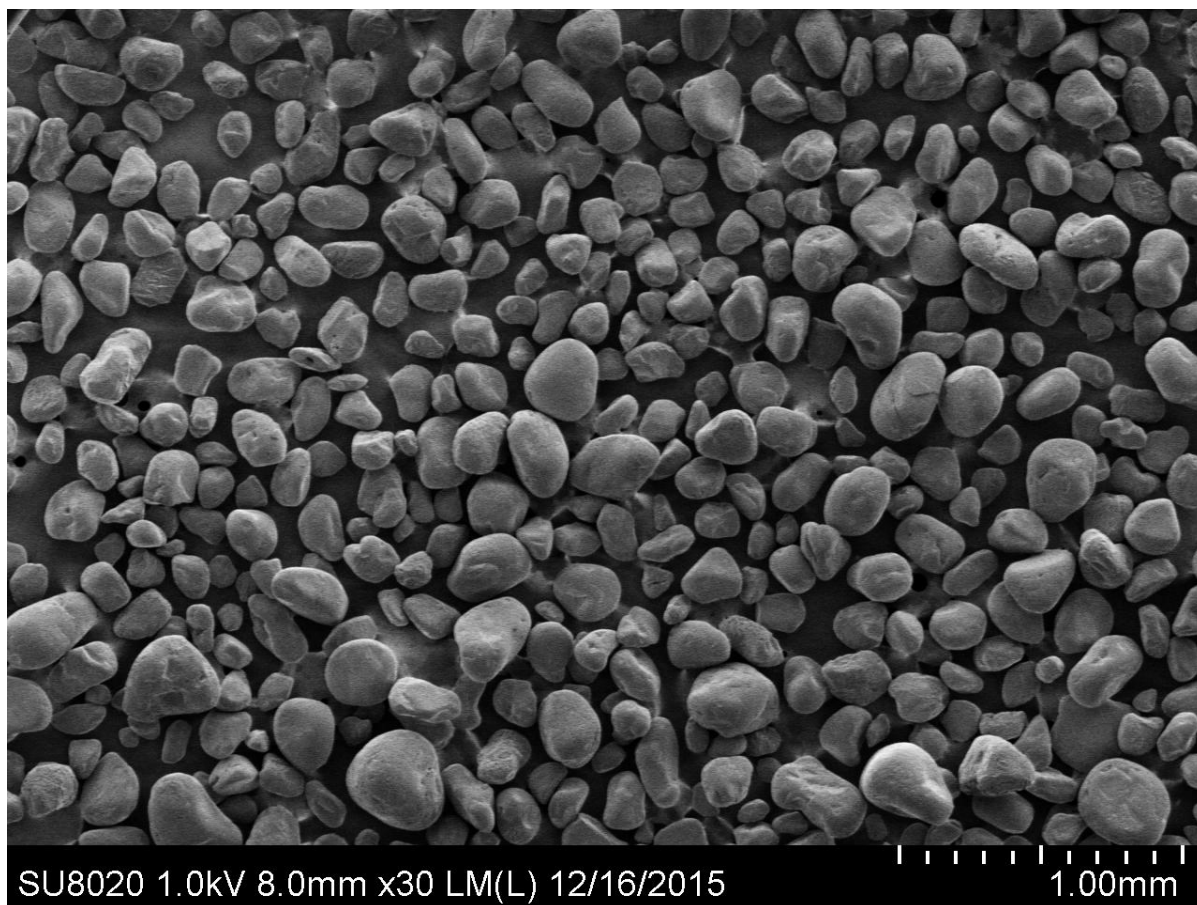


Figura 39. Morfología de los granos de Arena Oklahoma (Imagen extraída de SEM).

Como se puede apreciar en la figura 39 existen distintos tamaños de grano incluso en una muestra pequeña de arena, es por eso que se realizan las granulometrías a la arena, para poder establecer que tamaño de grano predomina en cada mezcla.

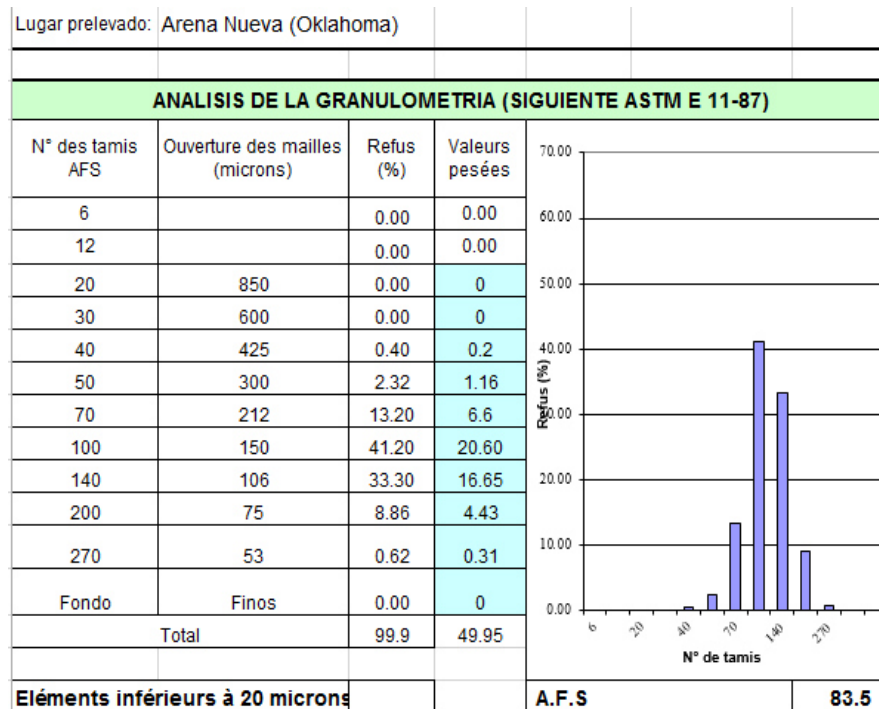


Figura 40. Análisis Granulométrico de la Arena Oklahoma

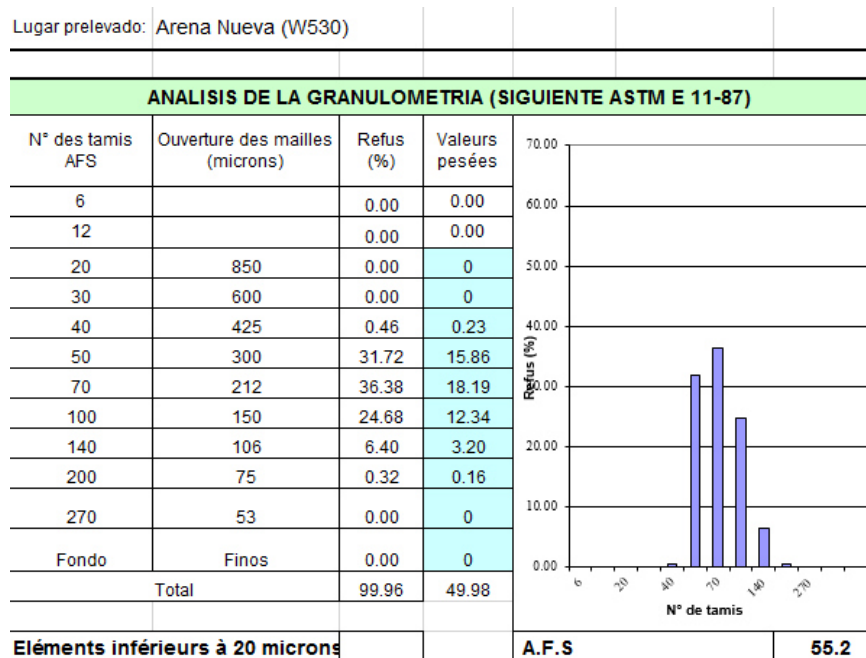


Figura 41. Análisis Granulométrico de la Arena W530.

Tal como se indicó, existen distintos tamaños de grano, en una misma muestra de arena, con el análisis granulométrico (figuras 40 y 41), es importante conocer esto ya que la granulometría de las arenas influye directamente en la cantidad de resina a utilizar para su solidificación.

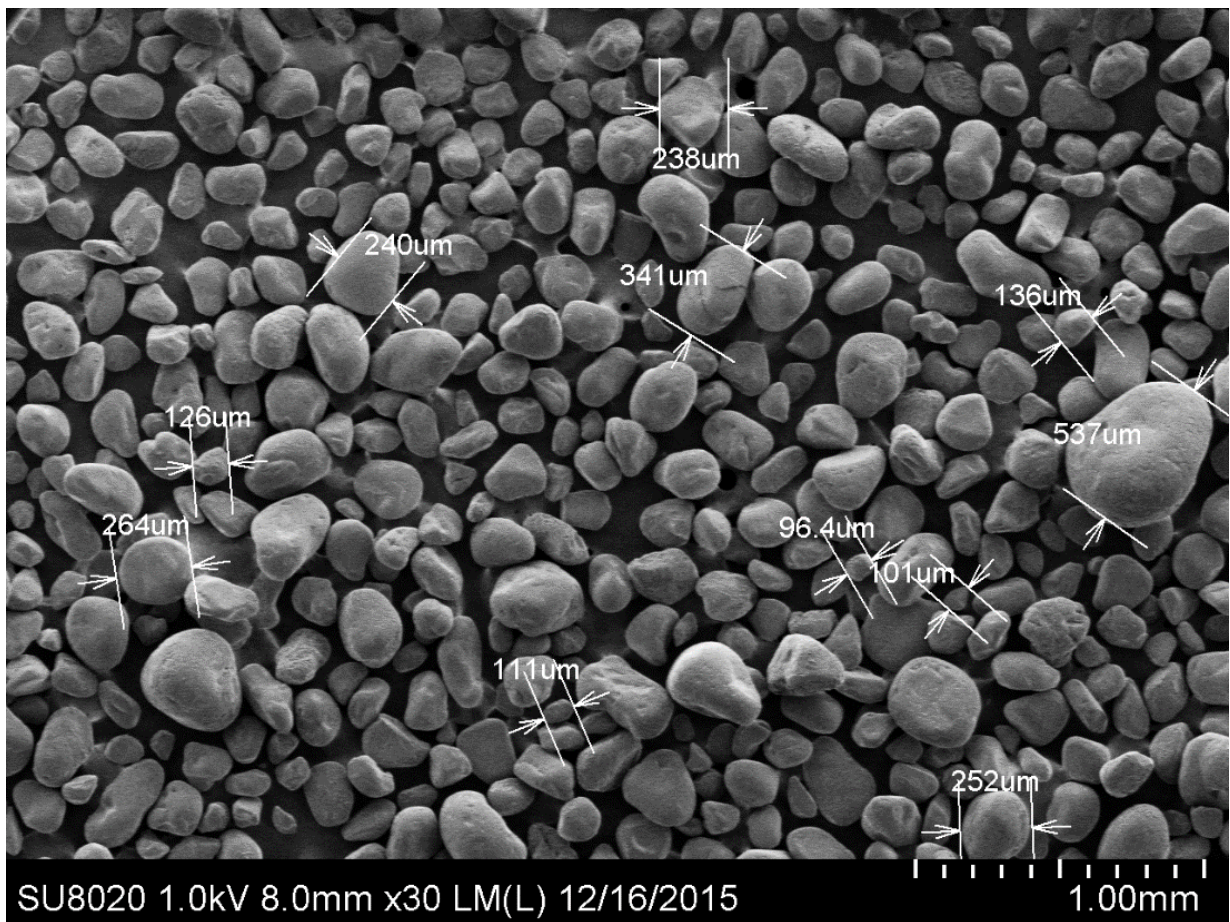


Figura 42. Se muestran los granos de arena y sus tamaños, lo cual da una idea de qué tamaño predomina en la muestra, más allá de los resultados obtenidos en el análisis granulométrico.

Se acotaron algunos granos en la imagen tomada en SEM (figura 41) para dar una idea más clara de que tamaño predomina en la muestra de arena que se sustrajo para el estudio. La imagen señala que los granos con tamaños entre 100 y 150μm son los que predominan, resultado que sirve para demostrar lo obtenido antes en el análisis granulométrico.

4.1 Obtención de la mezcla ideal

Para lograr encontrar una mezcla que garantizara el correcto desempeño del molde durante la etapa del maquinado, se hicieron pruebas de mezclado, gasificación, dándose además el tiempo óptimo establecido por la empresa en investigaciones anteriores.

Con las pruebas de mezclado se pudieron conseguir los siguientes resultados: tiempo óptimo de mezclado, tiempo óptimo de gasificación y concentración correcta para el mejor sinterizado de los moldes. A continuación se describen cada uno de los resultados obtenidos más detalladamente:

4.1.1 Tiempo óptimo de mezclado:

Como se mencionó en el capítulo anterior para las pruebas de mezclado se utilizó el molino de la empresa, el cual no permite modificar parámetros como las revoluciones por minuto o la potencia, por lo que se considera constante y de él sólo se toma como variable el tiempo de mezclado.

Para poder obtener un valor de resistencia óptimo, se hicieron pruebas con diferentes tiempos de mezclado y para determinar cuál de ellas tenía mejor desempeño, por lo que se les realizó el ensayo de resistencia a la tensión, con esto se obtuvo que, cuando la arena y resina se mezclan por un tiempo de cinco minutos, se obtiene la mejor resistencia, ya que sí, el tiempo de mezclado es menor o mayor al indicado, la resistencia se ve claramente reducida (figura 45). Esto se pudo determinar por medio de las mediciones de resistencia, ya que entre más se mezclaba, era menor el tiempo de “vida” de dicha mezcla, pues al ser una resina termo-activa empezaba a reaccionar con el CO₂ propio del ambiente, por lo que comenzaba un proceso de solidificación antes de su utilización, ahora bien, cuando una mezcla de arena y resina, no tenían el tiempo de mezclado suficiente, se podían observar cúmulos de

resina sin mezclar, lo que ocasionaba que la mezcla no tuviera propiedades homogéneas, dificultando su uso.

4.1.2 Tiempo óptimo de gasificado

Para poder encontrar la cantidad de gas que se debe suministrar de manera óptima, se hicieron probetas a diferentes tiempos de gasificación (figura 43), los cuales son mencionados en la figura 45, esto con el único fin de poder encontrar la cantidad de gas que pudiera proporcionar la resistencia más alta.



Figura 43. Proceso de gasificación.

Una vez que se obtuvieron las mezclas de arena, se pudo comprobar cómo el tiempo de gaseo afecta directamente la resistencia de las probetas, propiedad relevante para la manipulación de moldes, durante los traslados y el maquinado de los mismos.

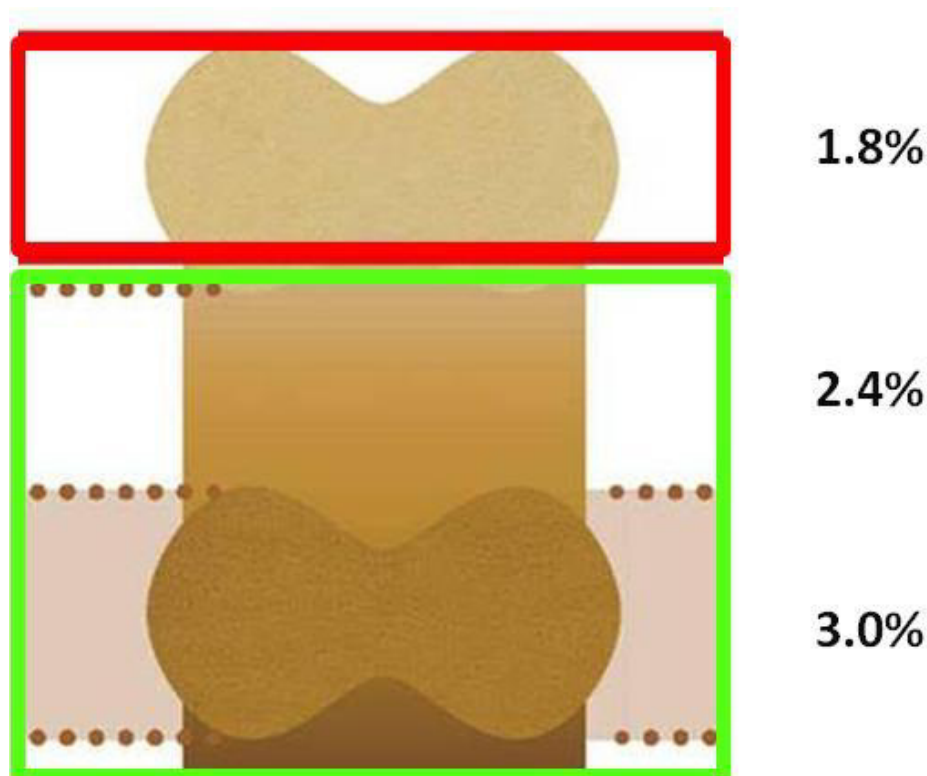


Figura 44. Coloración que toman las probetas con respecto al porcentaje de resina utilizado en su curado.

La coloración que adquieren los moldes o probetas (figura 44) es una muestra de la repercusión que tienen tanto el porcentaje de resina como el tiempo de gasificación de las mezclas, es decir, si la probeta tiene una tonalidad muy clara, indica que tiene una escasa resistencia, notablemente sufre desmoronamiento, al no haber obtenido un curado idóneo. Por el contrario, si la probeta obtiene una coloración muy oscura, es debido a una gasificación excesiva, lo que producirá fragilización y una rigidez que desencadenará en la fractura de la probeta durante su maquinado.

Se pudo observar que si las probetas eran expuestas a flujos incorrectos de CO_2 , estas mostraban un desempeño deficiente, pues con poco tiempo de gasificado, el curado era insuficiente, ocasionando el desmoronamiento de los moldes, mientras que con un tiempo de gasificación excesivo, la fragilización se hacía presente en las probetas, ocasionando que estas no soportaran adecuadamente cargas de esfuerzos que se les aplacaran. Las probetas sufren un aumento de resistencia conforme se

gasifican, pero llega un momento en el que después de haber obtenido una resistencia alta, la probeta comienza a degradarse, tal como se muestra en la figura 45, donde al ir incrementando su resistencia, llega un momento en el que obtienen una resistencia máxima, a partir de la cual, si se continua gasificando, las probetas, se vuelven frágiles al obtener tanta rigidez que se vuelven difíciles de manipular.

Una vez que se encontró que gasificar las probetas durante un tiempo de 40 segundos era la condición que mantenía la mejor resistencia para las probetas, se utilizó a esa condición como base, ya con ella se hicieron el resto de las pruebas.

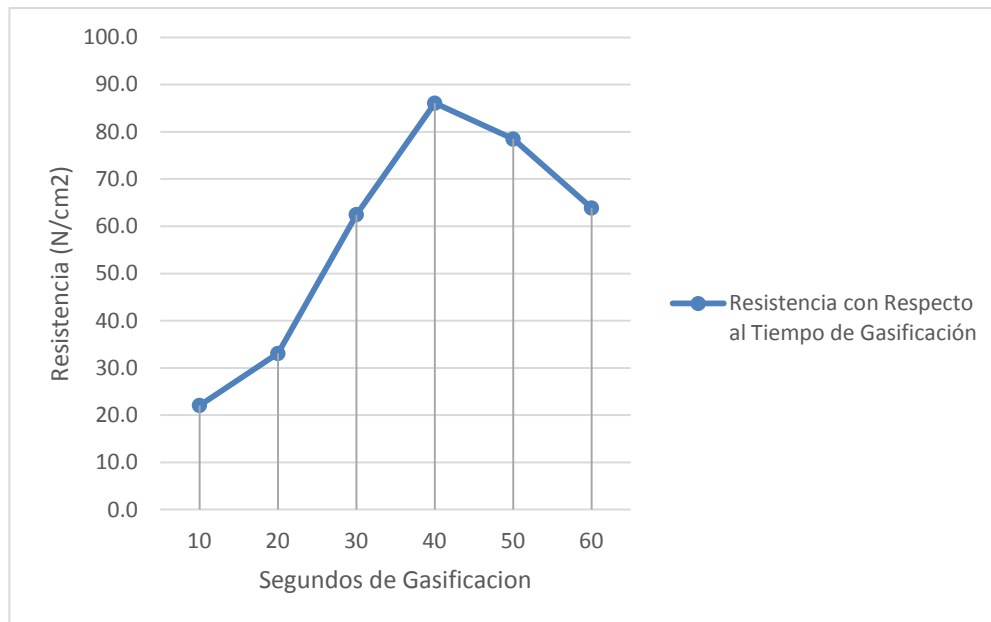


Figura 45. Resistencia de las probetas a diferentes tiempos de gasificación.

En la figura 45 se puede ver como es capaz de aumentar la resistencia de una mezcla con respecto al tiempo de gasificado, sin embargo hay un punto en el cual el gas recibido provoca una caída en la resistencia de la mezcla. Los resultados mostrados son de pruebas realizadas con un porcentaje medio de la concentración de resina, en ella se muestra la tendencia que siguen las probetas en cuanto a la resistencia adquirida.

El haber trabajado con distintos porcentajes de resina (1.8, 2.4 y 3%), trajo consigo mezclas con distintas propiedades, esto debido a la forma en que se recubrían los granos de arena con la cantidad de resina utilizada, es decir, a mayor concentración de resina (3%), la mezcla presenta mejores propiedades, es decir, se aprecia una mejor cohesión entre las partículas y las muestras fabricadas, lograron ser más resistentes que aquellas fabricadas con mezclas en las que se usó menor cantidad de resina (1.8 y 2.4%).

Sin embargo, una vez que se pudo comprobar lo enunciado en el párrafo superior, que indica que el porcentaje de resina mejora las propiedades físicas de las probetas, se realizaron ensayos para cada concentración de resina, pero ya con la gasificación previamente determinada (40 segundos), esto para demostrar qué concentración con una gasificación con CO₂ durante los 40 segundos establecidos desarrollaba la mayor resistencia posible, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resistencia en N/cm² obtenida para cada una de las concentraciones de resina estudiadas.

Mezcla al 1.8%									
Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de Resistencia	25	28	33	19	26	20	17	24	25

Mezcla al 2.4%									
Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de Resistencia	46	54	63	51	39	60	68	56	59

Mezcla al 3.0%									
Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de Resistencia	84	72	92	94	88	79	94	84	93

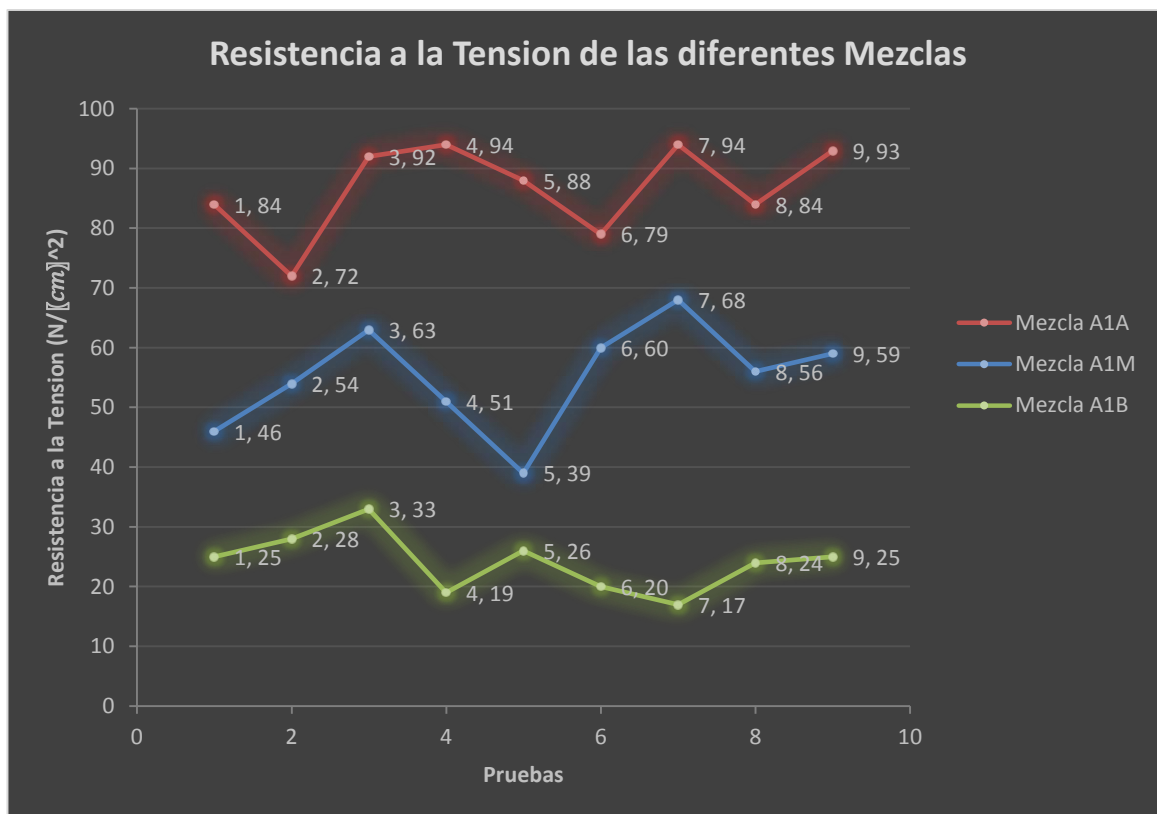


Figura 46. Resultados obtenidos de resistencia para cada concentración de resina Ecolotec.

Como se puede ver en la figura 46, la resistencia más alta es la que se logra utilizando el 3.0% de resina, gasificando durante el tiempo establecido durante el análisis experimental. Para que la mezcla pudiera alcanzar un desempeño óptimo en los procesos posteriores, se trabajó con la mezcla que pudiera alcanzar una mayor resistencia, esto debido a que al lograr una resistencia superior, tendría un mejor desempeño durante su manipulación y traslados, evitando fracturas o pérdidas de masa antes del proceso de maquinado.

4.2 Resultados de maquinabilidad

Después de haber encontrado los parámetros que demostraron tener un mejor desempeño para la fabricación de probetas, se comenzaron las pruebas de maquinado, en esta sección encontrará los resultados obtenidos con los experimentos de maquinado realizados.

4.2.1 Maquinado con Equipo convencional

Una vez encontrada la mezcla optima, siguieron las pruebas de maquinabilidad, esta vez la probeta no sería la utilizada para las pruebas de resistencia, dichas pruebas fueron realizadas en primera instancia en una fresadora de tipo convencional propiedad de la U.A.N.L.

A continuación se muestran la totalidad de las mezclas con las que se trabajó originalmente (tabla 8), de acuerdo a la clasificación que se dio en el capítulo 3.

Tabla 8. Diferentes clasificaciones que se le dieron a las mezclas con las que se trabajaron.

Clasificación de mezclas Ecolotec			Clasificación de Mezclas Pepset
A1B	A1M	A1A	A1R
A2B	A2M	A2A	A2R

De las pruebas finales de maquinado, se obtuvieron los siguientes resultados:

Las mezclas A1B y A2B: Tienen la más baja resistencia de las resistencias medidas, alrededor de 20 N/cm², lo que evita que no logren solidificar adecuadamente y por lo tanto no se pueden maquinar fácilmente, debido a que sufren desmoronamiento durante el proceso.

Las mezclas A1M y A2M: Tienen una resistencia promedio de 55 N/cm² lo que las hace más resistentes a las probetas fabricadas con concentración baja, además, estas se sinterizan adecuadamente, pero durante el maquinado se pudo observar que es común que sufran desmoronamiento.

Los bloques de las mezclas A1A y A2A: Presentan una mayor resistencia a la tensión, en promedio pueden alcanzar los 86 N/cm² y comparadas con todas las probetas ecolotec, son las que logran sinterizar de

manera más efectiva, además de mostrar un mejor desempeño durante el proceso de maquinado.

Por último las probetas, A1R y A2R, al igual que las probetas anteriores, tienen una resistencia semejante y sinterizaban adecuadamente en un lapso menor, ya que en una hora, las probetas pueden ser utilizadas, sin embargo durante el maquinado se pudo observar que las probetas, a diferencia de todas las anteriores, sufren una elevación en su temperatura en las zonas de maquinado debido a la fricción y dan la apariencia de estar “quemadas”, además durante el tiempo que lleva a cabo el proceso desprenden gases, debido al mismo calentamiento que sufren.

Se buscaba obtener una mezcla que permitiera una buena maquinabilidad para moldes de arena, justamente la maquinabilidad podría definirse como la propiedad que presentan los materiales, que permiten que les sea removida parte de ellos, por la acción de una herramienta de corte.

Con las pruebas realizadas se pudo obtener que las velocidades mínimas óptimas para que los bloques puedan ser maquinados son: 1500 rpm y con una velocidad de avance de 0.35 cm/seg.

Cabe mencionar que después de concluidas las pruebas de maquinabilidad las mezclas A1B y A2B fueron descartadas para seguir siendo utilizadas debido a que presentaban un pobre desempeño, es decir, sufrían desmoronamiento, durante el proceso de maquinado, esto debido a un curado deficiente. Por otro lado las probetas A1R y A2R fueron también descartadas (figura 49), aunque no por presentar una maquinabilidad deficiente, sino por cuestiones de apariencia ya que los bloques daban un aspecto de quemados después de llevar a cabo el proceso, esto se aprecia fácilmente, ya que las zonas maquinadas adquieren una tonalidad oscura; para evitar complicaciones y al hecho de que podrían desprender vapores tóxicos al elevarse en exceso su temperatura con esos parámetros de maquinado, se optó por descartarlos como sujeto de pruebas, además, este tipo de arena

tiene un confinamiento distinto, después del proceso de vaciado del metal, lo que la vuelve aún más contraproducente. Pues toda la arena que se utilice no podría ser reciclada, encareciendo el costo del proceso.

Bajo estas condiciones, el resultado de manera preliminar indica que no existen diferencias apreciables en las mezclas A1A y A2A (figura 47), pero si estas mezclas se compraran a su vez con las A1M y A2M (figura 48), si se ven claramente superiores, pues presentan un mejor desempeño durante el maquinado.



Figura 47. Bloques del tipo A2M y A2A una vez maquinados.

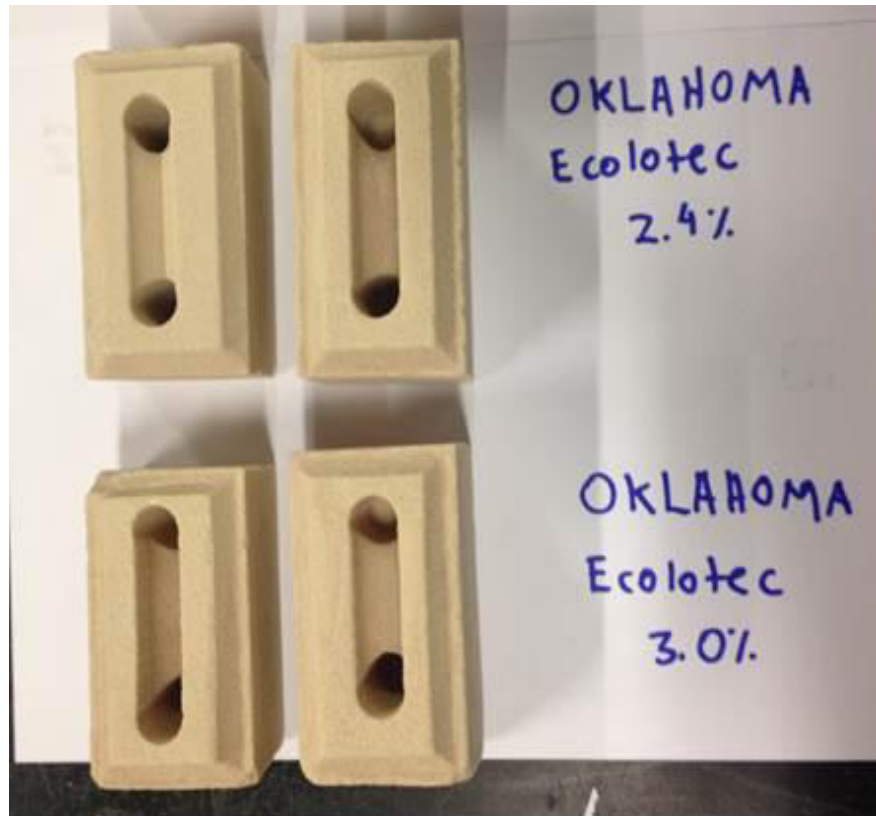


Figura 48. Bloques del tipo A1M y A1A una vez maquinados.

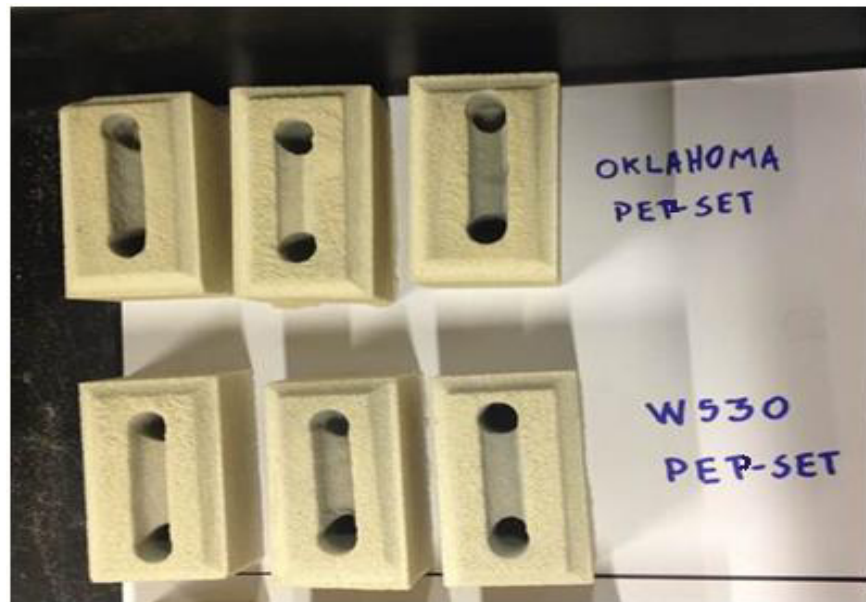


Figura 49. Bloques en las condiciones A1R y A2R.

Como parte de los resultados de maquinabilidad, se obtuvieron unas imágenes que demuestran las diferencias entre un bloque de la mezcla A1A y otro de la mezcla A1R (figura 50), el aspecto visual fue otro factor determinante para descartar esta última.

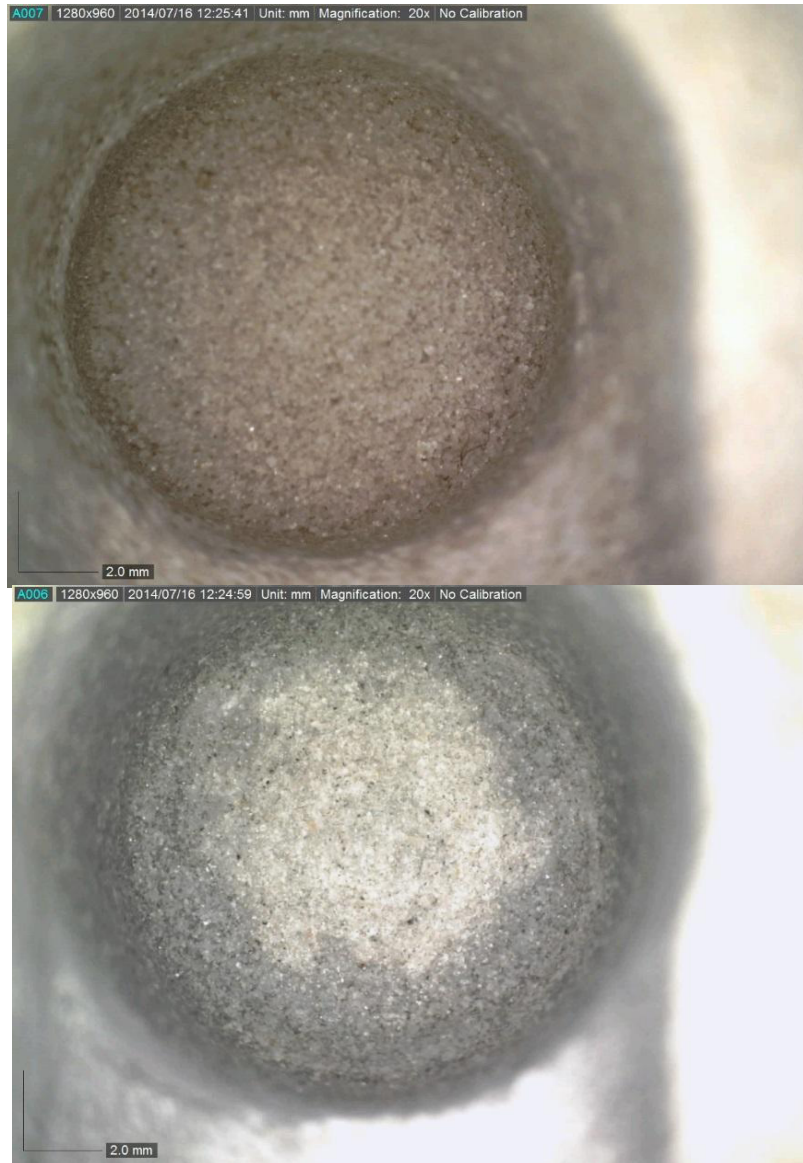


Figura 50. En la imagen superior se muestra un barrenado hecho en uno de los bloques de la mezcla A1A, mientras que en la imagen inferior es de una mezcla A1R.

En las imágenes superiores se puede ver la diferencia que se produce en el maquinado de ambos bloques, el aspecto calcinado dio pie a declinarse por el uso de mezclas pep-set, pues podría traer complicaciones futuras.

Además del acabado de los bloques se pudo comprobar el alto grado de desgaste que sufren los herramientales después del maquinado de las piezas (figura 51), con una fotografía tomada a un par de estas herramientas, una herramienta nueva y la otra utilizada en el proceso.



Figura 51. Herramientales de acero utilizados en el maquinado de los bloques de arena. A la izquierda una herramienta nueva, a la derecha una herramienta después de haber sido utilizada para maquinar los bloques.

Cada una de las mezclas posee propiedades únicas, lo que las hace muy diferentes entre sí, es por eso que se pueden clasificar sin mayor problema y elegir la que mejor convenga a los intereses del proceso para los cuales está pensado.

▪ Toxicidad

Otro de los factores a señalar es la probable toxicidad que puedan presentar algunas resinas, sin embargo esto no había sido sujeto de interés y fue sino hasta que el proceso de maquinado reveló el desprendimiento de gases mientras este era llevado a cabo (figura 52).

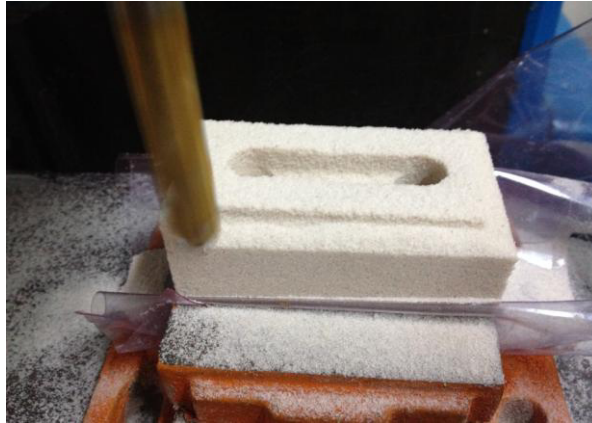


Figura 52. Fue durante el maquinado de moldes que se pudo apreciar el desprendimiento de gases de los moldes Pep-set. Debido tal vez a la fricción y al calor producido.

4.3 Pruebas de vaciado

4.3.1 Resultados de las pruebas de vaciado preliminares

Las primeras pruebas de vaciado fueron realizadas en las instalaciones de la universidad (ver capítulo 3) arrojando como resultado un excelente desempeño de los moldes, pues se pudo apreciar un muy buen acabado superficial (figura 53), en dicho proceso se utilizó aluminio como material a vaciar, el acabado superficial se consideró bueno tomando en cuenta que se midió una rugosidad media (R_a) en las piezas vaciadas de 8μ , gracias a esto la limpieza realizada con un sand-blast apenas fue utilizada

Sin embargo esas pruebas fueron hechas con una aleación de aluminio, cuya densidad es aproximadamente de 2.70 g/cm^3 lo que la aleja mucho de las densidades de las diferentes aleaciones que se producen en la empresa y para las cuales está pensado el proceso de maquinado de moldes (esto es, entre 7.5 g/cm^3 y 8.2 g/cm^3), esto implica una gran diferencia en la fuerza de empuje que ejercen sobre el molde dichas aleaciones, ya que en aceros es muy superior a la que se manifiesta en una colada de aluminio.

A pesar de las diferencias entre las aleaciones, este resultado dio cabida a pensar que el acabado superficial de los moldes con las superaleaciones de la empresa sería similar, permitiendo que las piezas puedan ser vaciadas sin complicaciones especiales.



Figura 53. Primeras piezas vaciadas en aluminio.

4.4 Maquinado con robot

La maquinabilidad de los moldes de arena permitió la realización de pruebas cada vez más complejas, las primeras de ellas, con piezas que no tenían gran complejidad geométrica (figura 54), sin embargo este proceso aunque sencillo, es lento, esto para poder asegurar la inocuidad de los moldes, que tienden a fragilizarse.

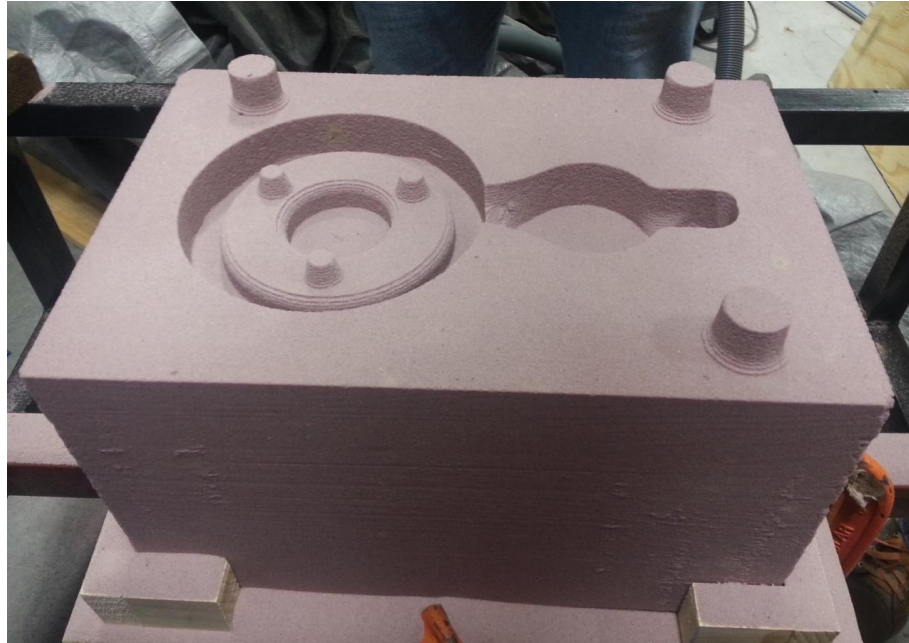


Figura 54. Molde preliminar terminado.

Después de lograr la fabricación exitosa de un molde con el proceso estudiado (figura 54), se continuó con la realización de las pruebas, pero esta vez molde de mayores dimensiones, para probar el desempeño del método con geometrías más complejas (dimensión del molde utilizado 1500mm x 1500mm).

Para llevar a cabo su maquinado, se realizó primero el montaje del molde (figura 55), ya que a diferencia de la caja de corazones, en esta ocasión el proceso sería llevado a cabo sobre la mesa del robot.



Figura 55. Montaje del molde a maquinar sobre el robot.

Con el molde asegurado, el robot preparado, las herramientas adecuadas y el programa listo, se procedió al maquinado de la pieza (Figura 56), la prueba inicial consistió en el maquinado de una pieza ya existente en la pieza, esto con el fin de tener punto de comparación entre el proceso propuesto y el existente.



Figura 56. Proceso de maquinado de un molde.

En la figura 57 podemos ver el molde finalizado; como se ha comentado al inicio de este proyecto de investigación, en la empresa se utilizan modelos para formar las figuras de las piezas que se quieren fabricar, la implementación de un sistema de maquinado de moldes, reducirá el costo de fabricación de estos modelos así como acortará los tiempos de entrega, al eliminar los tiempos de espera que da el proveedor de modelos.

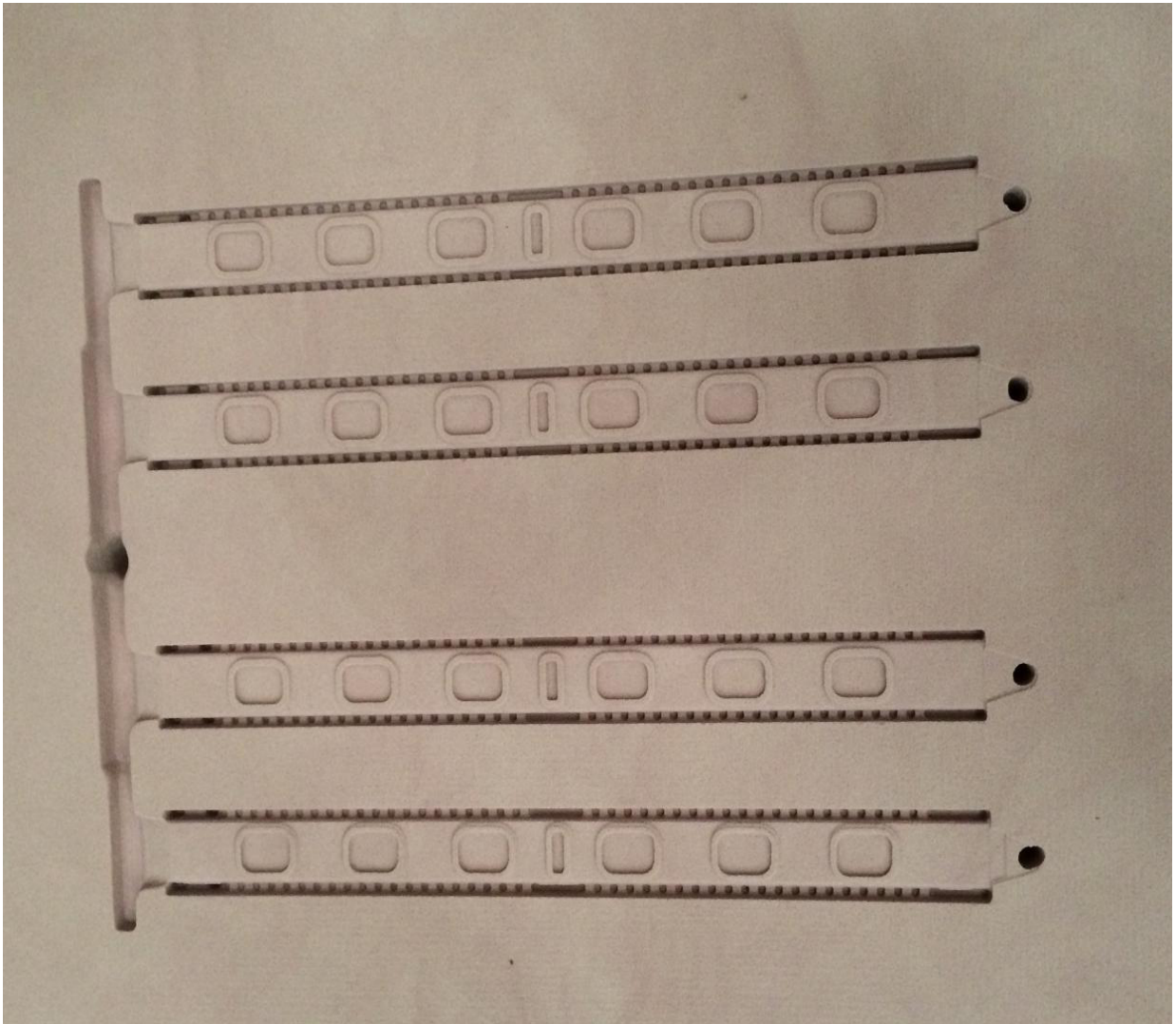


Figura 57. Molde terminado.

Con el molde terminado, es decir el maquinado de la tapa y fondo, se procedió al cerrado del mismo, cabe señalar que este molde también tiene su fabricación en moldeo en verde, con el uso de un modelo, esto se pensó para poder llevar a cabo una comparación entre la calidad superficial y funcionalidad de la pieza, pues, si se tiene pensado que este proceso se usará para el desarrollo de prototipos, era bueno que primero se pudiera asegurar el proceso con la fabricación de piezas de producción en masa (figura 58).

El proceso del maquinado de moldes en arena es una actividad que tiene como objetivo la reducción en los costos de fabricación de modelos,

además de una disminución considerable en los tiempos de entrega de estos, ya que a diferencia de un molde hecho a partir de un modelo, que necesita de que su modelo sea terminado antes de empezar a moldear, este método cuenta con la ventaja de que una vez realizado el modelo, la producción de moldes es más acelerada.



Figura 58. Imagen del casting obtenido con un molde de arena química maquinado.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.0 Conclusiones

Por medio de este proyecto de investigación se pudo corroborar que, encontrando una mezcla de arena con resina autofraguante que cumpla con ciertas propiedades (como la resistencia a la tensión), es posible maquinar moldes que permitan vaciar piezas de superaleaciones dándoles un buen acabado superficial. En el proceso de preparación de la arena se encontró que, los dos tipos de resina que fueron utilizados durante la experimentación tienen un comportamiento muy distinto entre sí, porque químicamente reaccionan de diferente forma, por ejemplo en el caso de los moldes con resina pepset, se pudo demostrar que al ser una mezcla termoactiva, pueden seguir elevando su dureza durante el proceso de maquinado, pues la fricción de los herramientales tienden a elevar su temperatura durante el maquinado, además se pudo constatar que de ambas mezclas, la formada con resina ecolotec, tienen muchas diferencias dependiendo del porcentaje de resina utilizado y que variando los tiempos de mezclado y gasificado, estas propiedades cambiaban aún más. Cuando se usaron las mezclas que contenían entre 2.4 y 3.0% de resina ecolotec, se lograron las mejores propiedades durante el maquinado y cuando esta cantidad de resina se mezcló con la arena sílica de menor tamaño de grano el acabado superficial tuvo su mejor resultado.

Las arenas utilizadas fueron punto angular de este proyecto, pues se pudo observar como con una granulometría más fina, alrededor de 85 AFS (arena Oklahoma) las probetas poseían una mejor estabilidad durante el proceso de maquinado, además de mejorar la piel de los castings, sin

embargo la dimensión de sus granos dificultaría la salida de gases durante el proceso de vaciado de las piezas.

Se lograron determinar los tiempos de mezclado y gasificado que permitieron un mejor proceso de solidificación en los moldes, cinco minutos de mezclado, mostro ser el tiempo que lograba una mezcla más homogénea, además se pudo demostrar que la mezcla A1A fue la que mejor desempeño mostro en cada una de las pruebas realizadas; lo que se busco fue, lograr una mezcla que garantizara la manipulación de los moldes, reducir el desmoronamiento, para que posteriormente pudieran ser maquinados. Dicha mezcla fue la ecolotec al 3.0% con arena Oklahoma, ya que es la que otorga mayores ventajas para los procesos de manipulado y maquinado de moldes. En lo que respecta al gasificado, se pudo observar que a los 40 segundos el molde en cuestión tiene una solidificación excelente, sin embargo esto tendrá que ajustarse de acuerdo al tamaño o geometría del molde, ya que existen piezas que por su tamaño o forma requieran de mayor cantidad de gas para solidificar adecuadamente.

La consecución de una mezcla optima para el proceso de maquinado de moldes fue lograda en gran parte gracias a la medición de la resistencia que se hizo durante el análisis experimental, la mejor resistencia encontrada fue la que presento la mezcla A1A, puesto que su resistencia oscilo entre los 72 y 94 N/cm² valor que es muy superior al logrado por el resto de las mezclas estudiadas. La obtención de un buen valor para esta propiedades es muy relevante para el proceso puesto que dicha propiedad asegura que un molde pueda resistir a las diferentes fuerzas ejercidas sobre él, que provocarían que este se fracturara durante el proceso de manipulación y transporte a que debe de ser sometido para ser llevado del área de moldeo a la de maquinado de moldes.

Además de que, fue esta misma mezcla (A1A) con un 3.0% de resina la que permitió encontrar cuales son los parámetros mínimos necesarios para que el brazo robótico pueda maquinar los moldes sin perjudicar el estado del molde, garantizando las dimensiones, geometrías y forma de la pieza en cuestión, se obtuvo que la velocidad de avance de trabajo que permitía maquinar el molde adecuadamente eran de 0.2 m/s, teniendo un total de 5000 rpm y una velocidad desplazamiento 2 m/s cuando el desplazamiento era lineal.

Estos valores ayudaran a la rápida implementación del proceso, pues ya no habrá que empezar de cero con la búsqueda de parámetros de maquinado, para llevar a cabo el proceso, sino que se podrá empezar a maquinar utilizándolos y ya después cuando la producción así lo requiera acelerar el proceso aumentando las revoluciones y avance de los herramientas del equipo, ya que, a diferencia del equipo convencional utilizado en las primeras pruebas, el brazo robótico permitirá llevar el proceso a otro nivel.

Con la obtención de los parámetros (velocidad de avance, rpm) para el maquinado de los moldes, una vez maquinado el primer molde se pudieron hacer las pruebas de vaciado correspondientes, para comparar las mismas piezas fabricadas con cada uno de los procesos, logrando asegurar que la calidad del nuevo proceso es similar a la del proceso estándar, que usa modelos para formar las geometrías del molde, pero dando una clara ventaja a este proceso en el acabado superficial de las piezas comparadas con el moldeo tradicional.

A lo largo de la realización de este trabajo de investigación, varios métodos de preparación, así como parámetros fueron descartados (tal es el caso de las mezclas de resina ecolotec con una concentración al 1.8%), por el pobre desempeño que mostraron en cada una de las pruebas desarrolladas, es por eso que se puede asegurar que los valores mostrados son los que lograron los mejores resultados.

5.1 Recomendaciones

Desarrollar en el mediano plazo pruebas con materiales poliméricos, para que en un futuro, además de la creación de moldes, el proceso de maquinado robótico, sirva a la empresa para la fabricación de sus propios modelos, lo que le otorgara autonomía y evitaría que se dependiera de un tercero que fabrique dicho modelo, ayudándolo a reducir sus costos de fabricación, ya que solo se deberá adquirir la materia prima y disminuyendo los tiempos de entrega, pues ahora con solo tener el diseño se podrá empezar a trabajar en la codificación necesaria para el maquinado del modelo en cuestión.

Buscar algún material de mayor resistencia al desgaste para la fabricación de herramientas para el proceso de maquinado de moldes, que permita el maquinado de estos soportando el nivel de daño que sufren los aceros grado herramienta convencionales.

Tomar en cuenta la superficie a trabajar, en una escala de dureza es vital para poder seleccionar un material lo suficientemente duro para evitar un desgaste excesivo por parte de la arena, herramientas con punta de diamante son buenas opciones, pero considerablemente costosas.

En caso de probar con distintos materiales sin encontrar uno que satisfaga por completo la situación, buscar algún tipo de recubrimiento, que logre mejorar la resistencia al desgaste del material base usado en el herramental para mejorar su desempeño.

Otra alternativa, puede ser la adquisición de una máquina para el afilado o rectificado de herramientas, para asegurar que estas no pierdan su filo y mantener su geometría lo más intacta posible, esto con el fin de evitar la pérdida de sus dimensiones y poder garantizar la geometría final de las pieza,

ya que un material desgastado puede ocasionar problemas por un mal maquinado de moldes.

Por último, se debe crear un programa de mantenimiento preventivo, para asegurar el estado de los herramentales, comprobando así su funcionalidad y evitando que el desgaste sin una supervisión adecuada dañe moldes, piezas o incluso producciones enteras, perjudicando tiempos de entrega y reputación ante clientes.

5.2 Trabajo futuro

Aún hay mucho que mejorar en el proceso de maquinado, pues es algo que llevará tiempo, sin embargo, se puede apreciar que las piezas que se obtienen pueden ser comparadas con aquellas hechas con el uso de un modelo y que además de ser funcionales, tienen una calidad superficial similar.

Además de todo lo obtenido, cabe señalar que esta investigación dará cabida al desarrollo de un modelo de utilidad, pues los parámetros obtenidos ayudaran a la fácil implementación del proceso en esta y otras plantas.

También debe ser considerado el nivel de desgaste de los herramientas usados en el proceso, ya que como se mostró en el capítulo de resultados, el desgaste que sufren a causa de la abrasividad de la arena es importante, para el aseguramiento dimensional de las piezas fabricadas, por lo que se deberá buscar una alternativa a este problema, con herramientas que aseguren una mayor vida útil que las que fueron usadas durante las pruebas realizadas, pues los costos por la constante utilización de herramientas nuevas pueden ser un problema a mediano plazo.

Se tiene pensado que como parte de la implementación del método de maquinado de moldes se realicen pruebas fabricando modelos, es decir, la prueba piloto puede ser la realización del molde en área con el uso del equipo de control numérico, pero una vez que el prototipo sea aprobado, el proceso puede ir más allá, fabricando también el modelo o patrón de lo que será la pieza en gran escala, ya que, como se mencionó en capítulos anteriores, las ventajas del uso del robot está en producciones a pequeña escala, cuando la producción así lo requiera el equipo puede ser usado para otro tipo de trabajos, es decir, el mismo método tiene el potencial suficiente para la fabricación de los propios modelos, lo que abrirá para la empresa otra gama de posibilidades.

Bibliografía

1. Ask Chemicals. (s.f.). Technical Data Sheet PepSet. Dublin, Ohio, E.E.U.U.
2. Askeland, D. R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales (3a ed.). Missouri: Ciencias International Thomson.
3. ASM International Handbook Committee. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International. Alabama: Metals Handbook.
4. Atxaga, G., Erauzkin, E. Irisarri, A. M., Estructural, I., INASMET, F., & Pasealekua, M. COMPORTAMIENTO A TEMPERATURA ELEVADA DE UNA ALEACIÓN MOLDEADA RENE 41.
5. Beauvais, P. (2006). Manuel des sables à vert (éd. 1ère édition, Vol. 1). (E. T. Fonderie, Éd.) Sèvres Cedex, Paris, France: BNIF.
6. Barragán Serna, I. A. (2012). Influencia del Tratamiento Térmico sobre la Fatiga Térmica en un Acero AISI H13. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
7. Bernard, A., Delplace, J. C., Perry, N., & Gabriel, S. (2003). Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting optimisation. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 327-333
8. Brown, J. R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Oxford: Butterworth Heinemann.
9. Callister, W. D. (s.f.). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Utah: Reverté.
10. Cardenas Fernandez, J. (2012). Superaleaciones, un panorama general. Cuautitlan: Universidad Autonoma de México.
11. Chaparro Ferrucho, S. P. (2006, Noviembre 24). www.dialnet.unirioja.es. Consulté le 2015, sur dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2293143.pdf
12. Dewhirst, B. A. (2008). Castability Control in Metal Casting via Fluidity Measures: Application of Error. Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute.

13. Erazo Rosales, C. E., Flores Claros, S., & Monroy Parada, A. F. (2005). Determinación de la Composición Óptima de la Arena de Fundición Empleada para Fabricar Piezas de Hierro. San Salvador, Salvador: Universidad Centroamericana.
14. Foseco Metallurgical Inc. (2002). The Ecolotec Process. Cleveland, Ohio: Foseco Metallurgical Inc.
15. González López, J. R. (2001). Efecto de la Temperatura sobre las Propiedades Físicas y Corazones Producidos por el Proceso Fenol-Uretano en Caja Fría. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
16. Herrera, A. E. (2010). Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
17. Hurst, S. (1996). Metal Casting (Vol. 1). (CIP, Ed.) London, Southampton Row, UK: INTERMEDIATE TECHNOLOGY PUBLICATIONS.
18. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. (2014). Guía del Usuario de Patentes y Modelos de Utilidad. Ciudad de México: IMPI.
19. Juárez Hernández, D. A. (2013). Perspectivas del Estado Actual de la Industria de la Fundición en México. Situación Actual de la Industria de la Fundición en México (p. 14). San Nicolás de los Garza, Nuevo León: FIME-UANL.
20. Kursfeld, A. (1992). U.S. Patent No. 5,174,361. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
21. LAMET, Aggen, G., Akstens, F., Allen, M., Avery, H., & Babu, P. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys (10 ed., Vol. 1). The University of Alabama, Alabama, United States of America: Metals Handbook. Retrieved Marzo 2015.
22. Mahendru, P. (2013). Rapid Prototyping - Technology to Shorten the Product Design and Development Process. International Journal of Scientific & Engineering Research, 477-488.
23. MARÍN, J. J. (2004, Octubre). ECONOMÍA EN EL MAQUINADO PARA LA INDUSTRIA METALMECÁNICA. Cali, Colombia.
24. Menezes Nunes, R., Abbaschian, G., & Abramowitz, H. (1988). ASM Handbook Casting. ASM Handbook Committee.
25. Simpson, B., & Pardo, E. (2006). Recuperación de arenas tipo shell y su utilización en la producción de machos de caja fría con Politec. Fundidores, 2.
26. Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales (4ta ed.). Ciudad de México: Mc Graw Hill.

27. Wang, J., Zhang, G., & Fuhlbrigge, T. (2008). Force Control Technologies For New Robotics Applications. IEEE.
28. Zaeh, M. F., & Roesch, O. (2014). Improvement of the Machining Accuracy of Milling Robos. German Academic Society for Production Engineering.

Índice de Tablas

TABLA 1. SISTEMAS DE RESINA UTILIZADOS INDUSTRIALMENTE.	23
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS AGLUTINANTES POR EL MECANISMO DE CATALIZADO.	24
TABLA 3. PARÁMETROS DEL PROCESO ECOLOTEC.	50
TABLA 4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS RESINAS PEPSET.....	52
TABLA 5. PORCENTAJES UTILIZADOS PARA LA PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE ARENAS.....	53
TABLA 6. CLASIFICACIÓN USADA PARA EL VACIADO DE LOS BLOQUES CON LA ALEACIÓN DE LA EMPRESA Y TEMPERATURA DE VACIADO (ALEACIÓN UTILIZADA Ni-Cr).	70
TABLA 7. RESISTENCIA EN N/CM2 OBTENIDA PARA CADA UNA DE LAS CONCENTRACIONES DE RESINA ESTUDIADAS.....	87
TABLA 8. DIFERENTES CLASIFICACIONES QUE SE LE DIERON A LAS MEZCLAS CON LAS QUE SE TRABAJARON.	89

Índice de Figuras

FIGURA 1. ELEMENTOS TÍPICOS DE LAS SUPERALEACIONES.....	26
FIGURA 2. MAQUINA PROTOTIPADORA MARCA DIMENSION SST 1200ST.	30
FIGURA 3. CONSTRUCCIÓN DE UNA CASA POR EL MÉTODO “ADDITIVE TECHNOLOGY” CON EL USO DE UNA IMPRESORA 3D.	31
FIGURA 4. APLICACIONES TÍPICAS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO	32
FIGURA 5. PARTES Y FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO POR ESTEREOLITOGRAFÍA.....	35
FIGURA 6. A) HORNO DE LUZ ULTRAVIOLETA, EN DONDE SE INTRODUCEN LOS PROTOTIPOS PARA EL CURADO FINAL, B) YA QUE EL RESULTADO DE ÉSTE TIPO DE PROTOTIPADO ES UNA RESINA RESISTENTE, PUEDE PINTARSE Y APLICAR ACABADOS PARA HACERLO LUCIR COMO LA PIEZA FUNCIONAL FINAL.	36
FIGURA 7. PARTES Y FUNCIONAMIENTO DE LA FABRICACIÓN DE OBJETOS LAMINADOS.	37
FIGURA 8. PARTES PRINCIPALES Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE PROTOTIPADO RÁPIDO POR DEPOSICIÓN DE FUNDIDO.	39
FIGURA 9. PARTES Y OPERACIÓN DE LA MÁQUINA PARA LA GENERACIÓN DE PROTOTIPOS MEDIANTE SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER.	40
FIGURA 10. PARTES Y FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO DE IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL.	42
FIGURA 11. MORFOLOGÍA TÍPICA DE LOS GRANOS DE ARENA.	48
FIGURA 12. TAMIZADORA PARA LA REALIZACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA.....	49
FIGURA 13. DISEÑO ELEGIDO. CUENTA CON DOS BARRENOS, UN RANURADO Y UN BISELADO.	54
FIGURA 14. DISEÑO BÁSICO DE LA ADOBERA (TAMBIÉN CONOCIDO COMO MOLDE O CAJA) CON EL QUE SE FABRICARON LAS PROBETAS.	55
FIGURA 15. ENSAMBLE DE ADOBERAS DE MADERA, ANTES DE LA PREPARACIÓN DE ARENA.	57
FIGURA 16. SE DEBE MEDIR CON PRECISIÓN LA CANTIDAD DE RESINA A UTILIZAR, ANTES DEL MEZCLADO. A LA IZQUIERDA MEDICIÓN DEL PESO DE LA RESINA, A LA DERECHA MEZCLA DE ARENA CON AYUDA DE LA BATIDORA INDUSTRIAL.	57
FIGURA 17. TANQUE DE CO2 UTILIZADO PARA LA GASIFICACIÓN DE LOS MOLDES Y LOGRAR LA SOLIDIFICACIÓN DE LOS MISMOS.	58
FIGURA 18. FORMA DE LOS BLOQUES DE ARENA UNA VEZ DESMOLDADOS.	59
FIGURA 19. MAQUINA UNIVERSAL SIMPSON GEROSA.....	60
FIGURA 20. DIMENSIONES DE LA PROBETA TIPO GUITARRA PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN. .	62
FIGURA 21. FRESADORA MARCA SAIMP MODELO FU-1.	63
FIGURA 22. LAS BROCAS UTILIZADAS (LA OSCURA TIENE UNA MEDIDA DE 0.75” DE DIÁMETRO Y ES DE CARBURO DE TUNGSTENO, LA OTRA ES DE ACERO CONVENCIONAL Y TIENE UN DIÁMETRO DE 0.5”) .	64
FIGURA 23. PRUEBAS DE MAQUINADO	65
FIGURA 24. EJEMPLOS DE BLOQUES MAQUINADOS.....	65
FIGURA 25. HORNO DE GAS Y CUCHARON UTILIZADOS PARA EL VACIADO DE LAS PIEZAS EN ALUMINIO.	66
FIGURA 26. TOTAL DE MOLDES UTILIZADOS PARA LA PRUEBA DE VACIADO EN ALUMINIO.	67
FIGURA 27. MOLDES VACIADOS EN ALUMINIO.....	68
FIGURA 28. HORNO DE INDUCCIÓN CAPACIDAD 550 KG.	69
FIGURA 29. MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	70
FIGURA 31. MOLINO UTILIZADO PARA REALIZAR LAS MEZCLAS DE ARENA.	72
FIGURA 32. MEZCLADO DE ARENA CON LA RESINA Y EL CATALIZADOR.....	73
FIGURA 33. BLOQUE DE ARENA FABRICADO PARA MAQUINAR CON ROBOT	74
FIGURA 34. MONTAJE DE BLOQUE ANTES DE SER MAQUINADO.	75

FIGURA 35. PROCESO DE PREPARACIÓN DEL ROBOT EN LA CELDA IMPLEMENTADA. LOCALIZACIÓN DE EJES.	76
FIGURA 36. INICIO DEL PROCESO DE MAQUINADO.	77
FIGURA 37. LIMPIEZA DEL MOLDE DESPUÉS DEL DESBASTE.	78
FIGURA 38. MAQUINADO DE MOLDE PARA DAR ACABADO.	78
FIGURA 39. MORFOLOGÍA DE LOS GRANOS DE ARENA OKLAHOMA (IMAGEN EXTRAÍDA DE SEM).	80
FIGURA 40. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA OKLAHOMA.	81
FIGURA 41. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA W530.	81
FIGURA 42. SE MUESTRAN LOS GRANOS DE ARENA Y SUS TAMAÑOS, LO CUAL DA UNA IDEA DE QUÉ TAMAÑO PREDOMINA EN LA MUESTRA, MÁS ALLÁ DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.	82
FIGURA 43. PROCESO DE GASIFICACIÓN.	84
FIGURA 44. COLORACIÓN QUE TOMAN LAS PROBETAS CON RESPECTO AL PORCENTAJE DE RESINA UTILIZADO EN SU CURADO.	85
FIGURA 45. RESISTENCIA DE LAS PROBETAS A DIFERENTES TIEMPOS DE GASIFICACIÓN.	86
FIGURA 46. RESULTADOS OBTENIDOS DE RESISTENCIA PARA CADA CONCENTRACIÓN DE RESINA ECOLOTEC.	88
FIGURA 47. BLOQUES DEL TIPO A2M Y A2A UNA VEZ MAQUINADOS.	91
FIGURA 48. BLOQUES DEL TIPO A1M Y A1A UNA VEZ MAQUINADOS.	92
FIGURA 49. BLOQUES EN LAS CONDICIONES A1R Y A2R.	92
FIGURA 50. EN LA IMAGEN SUPERIOR SE MUESTRA UN BARRENADO HECHO EN UNO DE LOS BLOQUES DE LA MEZCLA A1A, MIENTRAS QUE EN LA IMAGEN INFERIOR ES DE UNA MEZCLA A1R.	93
FIGURA 51. HERRAMIENTALES DE ACERO UTILIZADOS EN EL MAQUINADO DE LOS BLOQUES DE ARENA. A LA IZQUIERDA UNA HERRAMIENTA NUEVA, A LA DERECHA UNA HERRAMIENTA DESPUÉS DE HABER SIDO UTILIZADA PARA MAQUINAR LOS BLOQUES.	94
FIGURA 52. FUE DURANTE EL MAQUINADO DE MOLDES QUE SE PUDO APRECIAR EL DESPRENDIMIENTO DE GASES DE LOS MOLDES PEP-SET. DEBIDO TAL VEZ A LA FRICCIÓN Y AL CALOR PRODUCIDO.	95
FIGURA 53. PRIMERAS PIEZAS VACIADAS EN ALUMINIO.	96
FIGURA 54. MOLDE PRELIMINAR TERMINADO.	97
FIGURA 55. MONTAJE DEL MOLDE A MAQUINAR SOBRE EL ROBOT.	98
FIGURA 56. PROCESO DE MAQUINADO DE UN MOLDE.	99
FIGURA 57. MOLDE TERMINADO.	100
FIGURA 58. IMAGEN DEL CASTING OBTENIDO CON UN MOLDE DE ARENA QUÍMICA MAQUINADO.	101